

Author

Title of the Thesis

Subtitle if
it is needed

Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor

Trondheim, June 2021

Norwegian University of Science and Technology
Faculty of Information Technology and Electrical Engineering
Department of Electronic Systems



Norwegian University of
Science and Technology

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Norwegian University of Science and Technology

Thesis for the Degree of Philosophiae Doctor
Faculty of Information Technology and Electrical Engineering
Department of Electronic Systems

Submitted dd/mm/yyyy;
Approved dd/mm/yyyy;
Date of defense dd/mm/yyyy; Rådsrommet G144 | (time)

Supervisors
Prof. Supervisor & Prof. Co-supervisor

Assessment Committee

- 1st opponent
Dr. 1st opponent,
Name of the institute in the original language
Name of the institute in English
City, Country
- 2nd opponent
Dr. 2nd opponent,
Name of the institute in the original language
Name of the institute in English
City, Country
- Additional members of the committee and administrator
Prof. committee

TITLE OF THE THESIS

Chapters 1-3 © 2021 Author (unless otherwise stated)
Chapter 4 © 2017 Name of journal publisher 1
Chapter 5 © 2018 Name of journal publisher 2
Chapter 6 © 2020 Name of journal publisher 3
Chapter 7 © 2021 Author

ISBN 123-45-678-9101-2 (printed ver.)
ISBN 123-45-678-9101-2 (electronic ver.)
ISSN 1234-5678 (printed ver.)
ISSN 1234-5678 (online ver.)

Doctoral theses at NTNU, 2021:12

Printed by NTNU Grafisk senter

*Dedicated to my abc,
Name*

*And to def,
Name*

LOREM IPSUM

DOLOR SIT AMET, CONSECTETUER ADIPISCING ELIT.

UT PURUS ELIT, VESTIBULUM UT, PLACERAT AC, ADIPISCING VITAE, FELIS.

CURABITUR DICTUM GRAVIDA MAURIS.

NAM ARCU LIBERO, NONUMMY EGET, CONSECTETUER ID, VULPUTATE A, MAGNA.

DONEC VEHICULA AUGUE EU NEQUE.

PELLENTESQUE HABANT MORBI TRISTIQUE SENECTUS ET NETUS ET MALESUADA FAMES AC TURPIS EGESTAS.

MAURIS UT LEO.

CRAS VIVERRA METUS RHONCUS SEM.

NULLA ET LECTUS VESTIBULUM URNA FRINGILLA ULTRICES.

PHASELLUS EU TELLUS SIT AMET TORTOR GRAVIDA PLACERAT.

INTEGER SAPIENT EST, IACULIS IN, PRETIUM QUIS, VIVERRA AC, NUNC.

praesent eget sem vel leo ultrices bibendum.

Aenean faucibus.

Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla.

Curabitur auctor semper nulla.

Donec varius orci eget risus.

Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam.

Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

- Some ONE



NAM DUI LIGULA, FRINGILLA A, EUISMOD SODALES, SOLlicitudin VEL, WISI.

MORBI AUCTOR LOREM NON JUSTO.

NAM LACUS LIBERO, PRETIUM AT, LOBORTIS VITAE, ULTRICES ET, TELLUS.

DONEC ALIQUET, TORTOR SED ACCUMSAN BIBENDUM, ERAT LIGULA ALIQUET MAGNA, VITAE ORNARE ODIS METUS A MI.

MORBI AC ORCI ET NISL HENDERERIT MOLLIS.

SUSPENDISSE UT MASSA.

CRAS NEC ANTE.

PELLENTESQUE A NULLA.

CUM SOCIIS NATOQUE PENATIBUS ET MAGNIS DIS PARTURIENT MONTES, NASCETUR RIDICULUS MUS.

ALIQUAM TINCIDUNT URNA.

NULLA ULLAMCORPER VESTIBULUM TURPIS.

PELLENTESQUE CURSUS LUCTUS MAURIS.

- SOMEONE

Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Preface

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

OBJECTIVES AND SCOPE

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis.

Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a fauibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

OUTLINES

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Acknowledgements

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae

risus porta vehicula.

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a fau-
cibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum
diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue
quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis
porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo
facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et
vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim
ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque
egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet,
laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at,
molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum
eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies
auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus.
Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non,
pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas
vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed
vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget
odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo
eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare
ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc
dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam.
Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos
hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula
eu, lacus.

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames
ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo.
Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum
fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac,
lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In
hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet,
placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada
ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Contents

ABSTRACT **VII**

PREFACE **IX**

ACKNOWLEDGEMENT **XI**

LIST OF FIGURES **XVII**

LIST OF TABLES **XIX**

NOMENCLATURE **XXI**

PART I BACKGROUND 1

CHAPTER 1 INTRODUCTION 3

1.1	Section 1 in chapter 1	3
1.1.1	Subsection 1.1 of section 1 in chapter 1	5
1.1.2	Subsection 1.2 of section 1 in chapter 1	6
1.2	Long section title displayed in the table of content	7
1.2.1	Subsection 1.2 of section 2 in chapter 1	9
1.3	References	9

CHAPTER 2 BACKGROUND 11

2.1	Section 1 in chapter 2	11
2.1.1	Subsection 2.1 of section 1 in chapter 2	13
2.1.2	Subsection 2.2 of section 1 in chapter 2	14
2.2	Long section title displayed in the table of content	15
2.2.1	Subsection 2.2 of section 2 in chapter 2	17

2.3 References 17

CHAPTER 3 EXPERIMENTAL METHODS 19

3.1 Section 1 in chapter 3 19

 3.1.1 Subsection 3.1 of section 1 in chapter 3 20

 3.1.2 Subsection 3.2 of section 1 in chapter 3 21

3.2 Long section title displayed in the table of content 22

 3.2.1 Subsection 3.2 of section 2 in chapter 3 24

3.3 References 24

PART II RESULTS 25

**CHAPTER 4 TITLE OF THE CHAPTER 4 DISPLAYED
IN THE TABLE OF CONTENTS 27**

Abstract 28

4.1 Section 1 in chapter 4 28

 4.1.1 Subsection 4.1 of section 1 in chapter 4 30

 4.1.2 Subsection 4.2 of section 1 in chapter 4 31

4.2 Long section title displayed in the table of content 32

 4.2.1 Subsection 4.2 of section 2 in chapter 4 34

4.3 References 34

**CHAPTER 5 TITLE OF THE CHAPTER 5 DISPLAYED
IN THE TABLE OF CONTENTS 35**

Abstract 36

5.1 Section 1 in chapter 5 36

 5.1.1 Subsection 5.1 of section 1 in chapter 5 38

 5.1.2 Subsection 5.2 of section 1 in chapter 5 39

5.2 Long section title displayed in the table of content 40

 5.2.1 Subsection 5.2 of section 2 in chapter 5 42

5.3 References 42

CHAPTER 6 TITLE OF THE CHAPTER 6 DISPLAYED
IN THE TABLE OF CONTENTS 43

Abstract 44

6.1 Section 1 in chapter 6 44

6.1.1 Subsection 6.1 of section 1 in chapter 6 46

6.1.2 Subsection 6.2 of section 1 in chapter 6 47

6.2 Long section title displayed in the table of content 48

6.2.1 Subsection 6.2 of section 2 in chapter 6 50

6.3 References 50

PART III EPILOGUE 51

CHAPTER 7 CONCLUSION 53

7.1 Section 1 in chapter 7 53

7.1.1 Subsection 7.1 of section 1 in chapter 7 54

7.1.2 Subsection 7.2 of section 1 in chapter 7 55

7.2 Long section title displayed in the table of content 56

7.2.1 Subsection 7.2 of section 2 in chapter 7 57

7.3 References 58

APPENDIX A SUPPLEMENTARY INFORMATION FOR CHAPTER 4 A-1

A.1 Detailed growth information A-1

A.2 References A-3

APPENDIX B SUPPLEMENTARY INFORMATION FOR CHAPTER 5 A-5

B.1 Additional micro-Raman spectroscopy measurements A-5

B.2 References A-6

APPENDIX C SUPPLEMENTARY INFORMATION FOR CHAPTER 6 **A-7**

- C.1 micro-PL spectra **A-7**
- C.2 micro-Raman spectra **A-8**
- C.3 References **A-9**

CURRICULUM VITAE **L-1**

DISSEMINATION OF RESEARCH **L-3**

COPYRIGHT PERMISSIONS **L-7**

INDEX **M-1**

List of Figures

CHAPTER 1

- 1.1 SEM images of AlN on graphene formed via different MEE cycles **4**

CHAPTER 2

- 2.1 SEM images of GaN nanocolumns on graphene formed via different AlN MEE cycles **12**

CHAPTER 3

- 3.1 Cross-sectional SEM images of GaN nanocolumns on graphene formed via different AlN MEE cycles **19**

CHAPTER 4

- 4.1 Simplified schematics of the AlN buffer structures and GaN nanocolumn formation on graphene **29**

CHAPTER 5

- 5.1 TEM image of GaN nanocolumn sample synthesized with nominally the same growth conditions as sample G1 **37**

CHAPTER 6

- 6.1 HRXRD measurements of the nanocolumns **45**

APPENDIX C

- C.1 RT micro-photoluminescence spectra of reference sample (HVPE-freestanding GaN), samples G1, G2 and G3 **A-7**

C.2 Micro-Raman spectroscopy of the nanocolumn samples,
including the graphene for each respective sample A-8

DISSEMINATION OF RESEARCH

D.1 Cover image/featured article in Nanotechnology L-4

List of Tables

CHAPTER 3

- 3.1 Experimental conditions described in the ToC 20

CHAPTER 5

- 5.1 Micro-Raman peak positions, intensities and ratios 41

CHAPTER 6

- 6.1 Al-content of each axial nanocolumn segment for the vertical GaN/AlGaN nanocolumn ensemble obtained from fitting the simulation model to the HRXRD $2\theta-\omega$ scan data 49

APPENDIX A

- A.1 Detailed growth conditions of nanocolumns A-2

APPENDIX B

- B.1 Summary of micro-Raman spectroscopy measurements for the as-grown nanocolumn sample A-5

Nomenclature

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

ACRONYMS

Al_2O_3	sapphire	LDs	laser diodes
AlGaAs	aluminium gallium arsenide	LED	light-emitting diode
AlGaN	aluminium gallium indium nitride	LEEBI	low-energy electron-beam irradiation
AlGnP	aluminium gallium indium phosphide	MBE	molecular beam epitaxy
AlN	aluminium nitride	MOCVD	metal-organic chemical vapour deposition
EQE	external quantum efficiency	MOVPE	metal-organic vapour phase epitaxy
GaAsP	gallium arsenide phosphide	QCSE	quantum-confined Stark effect
GaN	gallium nitride	RHEED	reflection high-energy electron diffraction
HVPE	hydride-vapor phase epitaxy	SEM	scanning electron microscope
InN	indium nitride	SiC	silicon carbide
IQE	internal quantum efficiency	UV	ultraviolet
ITO	indium tin oxide	ZnSe	zinc selenide

Part I

BACKGROUND

CHAPTER 1

Introduction

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum ⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 1.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum ¹⁻⁶.

1.1 SECTION 1 IN CHAPTER 1

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

$$EQE = \frac{q \times P_{opt}}{I \times h\nu} \quad (1.1)$$

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla

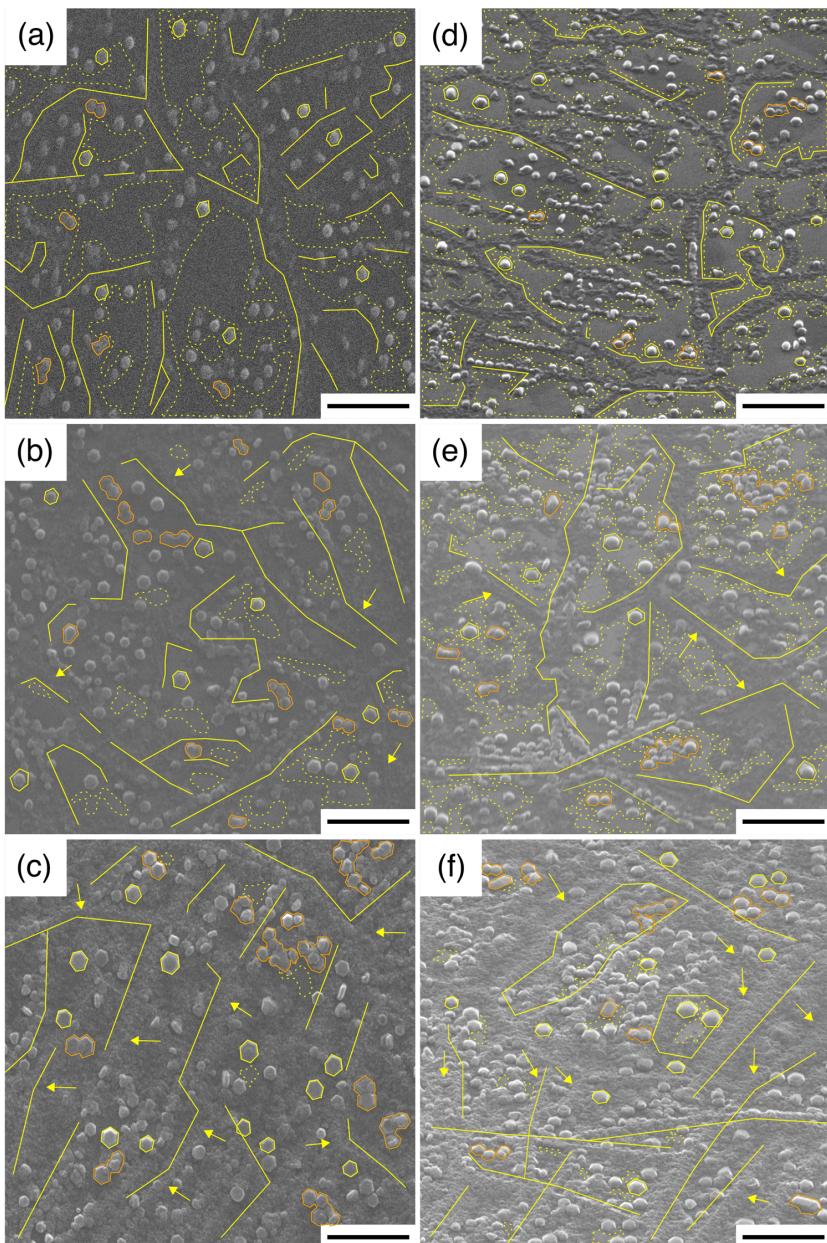


FIGURE 1.1. SEM images of AlN on graphene formed via different MEE cycles. (a,d), (b,e) and (c,f) are (top-, bird's eye-view) SEM images of samples A1, A2 and A3, respectively. Scale bars are $1\text{ }\mu\text{m}$. Features marked with yellow lines, yellow (orange) contours and yellow dashed outlines are high-density AlN nanostructures grown along line defects of graphene, individual (coalesced) AlN islands and areas of exposed graphene, respectively. Yellow arrows in samples A2 and A3 show the lateral growth of AlN nanostructures that initially nucleate at the line defects of graphene in sample A1 (adapted with permission from ref. 4 © Liudi Mulyo et al, 2020).

vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

1.1.1 Subsection 1.1 of section 1 in chapter 1

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

1.1.2 Subsection 1.2 of section 1 in chapter 1

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

1.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

Nulla non mauris vitae wisi posuere convallis. Sed eu nulla nec eros scelerisque pharetra. Nullam varius. Etiam dignissim elementum metus. Vestibulum faucibus, metus sit amet mattis rhoncus, sapien dui laoreet odio, nec ultricies nibh augue a enim. Fusce in ligula. Quisque at magna et nulla commodo consequat. Proin accumsan imperdiet sem. Nunc porta. Donec feugiat mi at justo. Phasellus facilisis ipsum quis ante. In ac elit eget ipsum pharetra faucibus. Maecenas viverra nulla in massa.

Nulla ac nisl. Nullam urna nulla, ullamcorper in, interdum sit amet, gravida ut, risus. Aenean ac enim. In luctus. Phasellus eu quam vitae turpis viverra pellentesque. Duis feugiat felis ut enim. Phasellus pharetra, sem id porttitor sodales, magna nunc aliquet nibh, nec blandit nisl mauris at pede. Suspendisse risus risus, lobortis eget, semper at, imperdiet sit amet, quam. Quisque scelerisque dapibus nibh. Nam enim. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc ut metus. Ut metus justo, auctor at, ultrices eu, sagittis ut, purus.

Aliquam aliquam.

1.2.1 Subsection 1.2 of section 2 in chapter 1

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

1.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 3.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 3.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 3.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 3, 4.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 3.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 3.

CHAPTER 2

Background

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum ⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 2.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum ¹⁻⁶.

2.1 SECTION 1 IN CHAPTER 2

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

$$EQE = \frac{q \times P_{opt}}{I \times h\nu} \quad (2.1)$$

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla

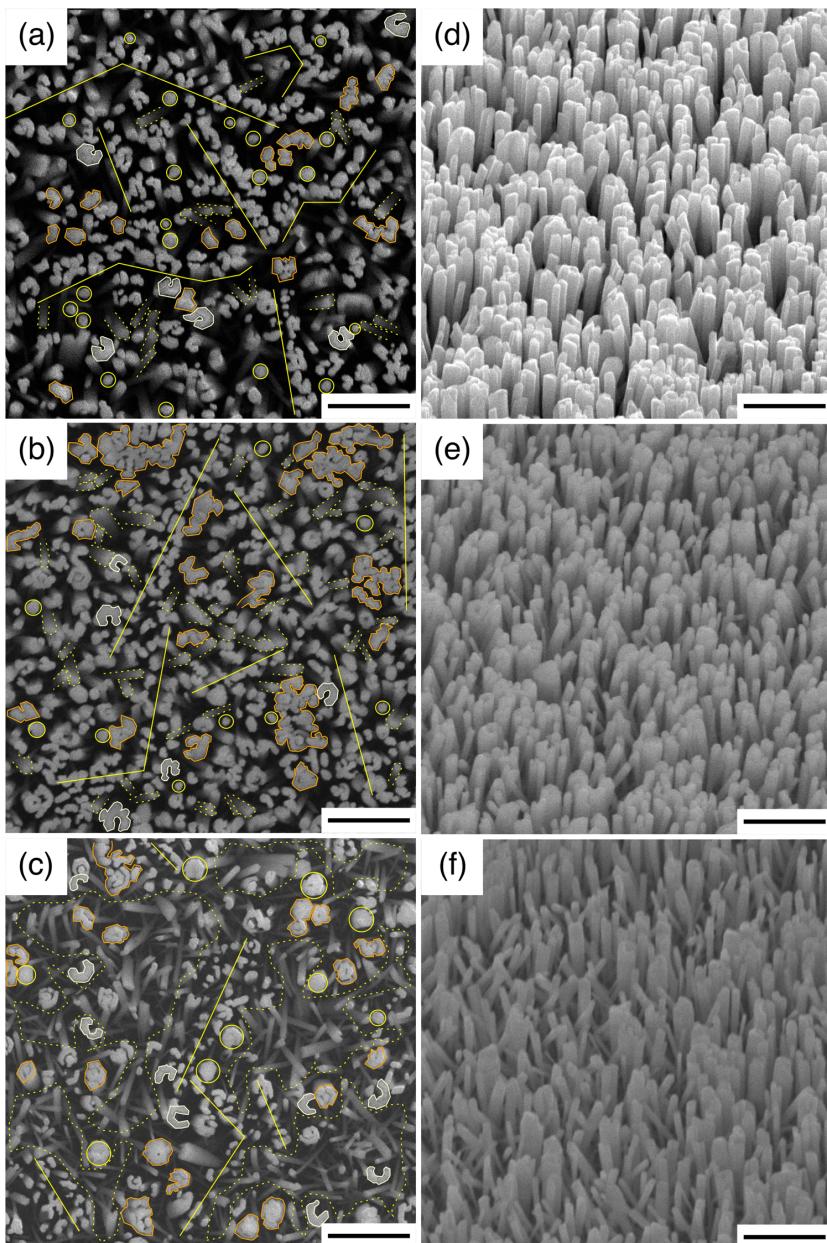


FIGURE 2.1. SEM images of GaN nanocolumns on graphene formed via different AlN MEE cycles. (a,d), (b,e) and (c,f) are (top-, bird's eye-view) SEM images of samples G1, G2 and G3, respectively. Scale bars are $1\ \mu\text{m}$. Yellow lines, yellow circles (orange contours) and yellow dashed outlines indicate row of high-density vertical GaN nanocolumns, individual (coalesced) vertical GaN nanocolumns and areas with individual tilted GaN nanocolumns, respectively. White outlines in sample G3 indicate the GaN nanotubular-like structures (adapted with permission from ref. 4 © Liudi Mulyo et al., 2020).

vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

2.1.1 Subsection 2.1 of section 1 in chapter 2

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

2.1.2 Subsection 2.2 of section 1 in chapter 2

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

2.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

Nulla non mauris vitae wisi posuere convallis. Sed eu nulla nec eros scelerisque pharetra. Nullam varius. Etiam dignissim elementum metus. Vestibulum faucibus, metus sit amet mattis rhoncus, sapien dui laoreet odio, nec ultricies nibh augue a enim. Fusce in ligula. Quisque at magna et nulla commodo consequat. Proin accumsan imperdiet sem. Nunc porta. Donec feugiat mi at justo. Phasellus facilisis ipsum quis ante. In ac elit eget ipsum pharetra faucibus. Maecenas viverra nulla in massa.

Nulla ac nisl. Nullam urna nulla, ullamcorper in, interdum sit amet, gravida ut, risus. Aenean ac enim. In luctus. Phasellus eu quam vitae turpis viverra pellentesque. Duis feugiat felis ut enim. Phasellus pharetra, sem id porttitor sodales, magna nunc aliquet nibh, nec blandit nisl mauris at pede. Suspendisse risus risus, lobortis eget, semper at, imperdiet sit amet, quam. Quisque scelerisque dapibus nibh. Nam enim. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc ut metus. Ut metus justo, auctor at, ultrices eu, sagittis ut, purus.

Aliquam aliquam.

2.2.1 Subsection 2.2 of section 2 in chapter 2

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

2.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 11.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 11.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 11.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 11, 12.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 11.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 11.

CHAPTER 3

Experimental methods

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum ⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 3.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum ¹⁻⁶.

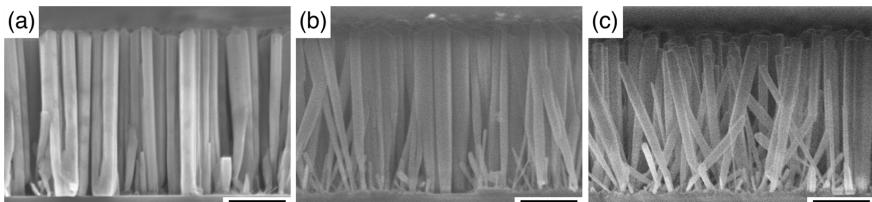


FIGURE 3.1. Cross-sectional SEM images of GaN nanocolumns on graphene formed via different AlN MEE cycles. Samples **(a)** G1, **(b)** G2, and **(c)** G3. Scale bars are 500 nm (adapted with permission from ref. [4](#) © Liudi Mulyo et al, 2020).

3.1 SECTION 1 IN CHAPTER 3

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

$$EQE = \frac{q \times P_{opt}}{I \times h\nu} \quad (3.1)$$

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa. Table 3.1 lists the experimental conditions of each sample synthesized in this study.

TABLE 3.1. Experimental conditions.

Sample ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
T _{sub} (°C)	100	110	120	130	140	150	160
Φ _{Ga} (Pa)	1.0×10 ⁻¹⁰	1.0×10 ⁻¹¹	1.0×10 ⁻¹²	1.0×10 ⁻¹³	1.0×10 ⁻¹⁴	1.0×10 ⁻¹⁵	1.0×10 ⁻¹⁵
Q _N (sccm)	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.00	2.1

3.1.1 Subsection 3.1 of section 1 in chapter 3

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non,

pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

3.1.2 Subsection 3.2 of section 1 in chapter 3

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetuer at, consectetuer sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetuer a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetuer. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

3.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetuer eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetuer tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

Nulla non mauris vitae wisi posuere convallis. Sed eu nulla nec eros scelerisque pharetra. Nullam varius. Etiam dignissim elementum metus. Vestibulum faucibus, metus sit amet mattis rhoncus, sapien dui laoreet odio, nec ultricies nibh augue a enim. Fusce in ligula. Quisque at magna et nulla commodo consequat. Proin accumsan imperdiet sem. Nunc porta. Donec feugiat mi at justo. Phasellus facilisis ipsum quis ante. In ac elit eget ipsum pharetra faucibus. Maecenas viverra nulla in massa.

Nulla ac nisl. Nullam urna nulla, ullamcorper in, interdum sit amet, gravida ut, risus. Aenean ac enim. In luctus. Phasellus eu quam vitae turpis viverra pellentesque. Duis feugiat felis ut enim. Phasellus pharetra, sem id porttitor sodales, magna nunc aliquet nibh, nec blandit nisl mauris at pede. Suspendisse risus risus, lobortis eget, semper at, imperdiet sit amet, quam. Quisque scelerisque dapibus nibh. Nam enim. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc ut metus. Ut metus justo, auctor at, ultrices eu, sagittis ut, purus.

Aliquam aliquam.

3.2.1 Subsection 3.2 of section 2 in chapter 3

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

3.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 19.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 19.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 19.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 19.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d). Cited on page/s 19.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d). Cited on page/s 19.

Part II

RESULTS

CHAPTER 4

Title of the chapter 4 displayed in the page

Author 1^{1,*}, Author 2^{1,2,*}, Author 3³, Author 4¹, Author 5¹, Author 6¹, Author 7^{2,4,#} and Author 8^{1,#} *Author 1 and Author 2 contributed equally to this study.

First published in: *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).

DOI: [10.1038/s41598-019-55424-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-55424-z)



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. It means that unrestricted use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format are allowed, as long as the original author(s) and the source are appropriately credited, a link to the Creative Commons license is provided, and any changes made are indicated. To view a copy of this license, please visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Liudi Mulyo *et al.*, 2020.

Contributions

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

¹Department X, University 1, City A, Country B. ²Department Y, University 2, City C, Country D.

³Institute E, City F, Country G. ⁴Research Center H, University I, City J, Country K. [#]e-mail: author7@university2.ac.countryD and author8@universityl.countryK

ABSTRACT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at (Figure 4.1), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶. For more information, see Appendix A, specifically in Table A.1.

4.1 SECTION 1 IN CHAPTER 4

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac

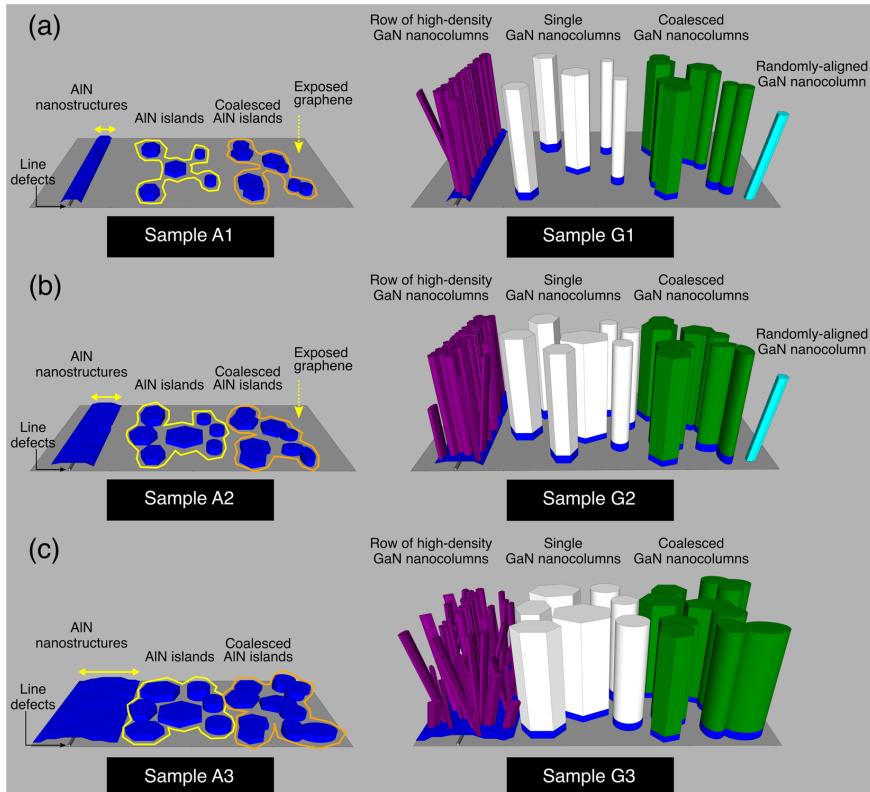


FIGURE 4.1. Simplified schematics of the AlN buffer structures and GaN nanocolumn formation on graphene. Samples (a) A1-G1, (b) A2-G2 and (c) A3-G3. There are two possible AlN (blue) nanostructures forming on graphene: 1) AlN islands and 2) AlN nanostructures along the line defects of graphene (the yellow arrows indicate their lateral growth spread further away from the line defects). Single (white) and coalesced (green) vertical GaN nanocolumn structures are nucleated from the AlN islands, while row of high-density nanocolumns (purple) form on the AlN nanostructures that spread from the line defects. Additional tilted nanocolumns (cyan) are likely to grow on exposed graphene (adapted with permission from ref. 4 © Liudi Mulyo et al, 2020).

quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

4.1.1 *Subsection 4.1 of section 1 in chapter 4*

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

4.1.2 Subsection 4.2 of section 1 in chapter 4

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

4.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

Nulla non mauris vitae wisi posuere convallis. Sed eu nulla nec eros scelerisque pharetra. Nullam varius. Etiam dignissim elementum metus. Vestibulum faucibus, metus sit amet mattis rhoncus, sapien dui laoreet odio, nec ultricies nibh augue a enim. Fusce in ligula. Quisque at magna et nulla commodo consequat. Proin accumsan imperdiet sem. Nunc porta. Donec feugiat mi at justo. Phasellus facilisis ipsum quis ante. In ac elit eget ipsum pharetra faucibus. Maecenas viverra nulla in massa.

Nulla ac nisl. Nullam urna nulla, ullamcorper in, interdum sit amet, gravida ut, risus. Aenean ac enim. In luctus. Phasellus eu quam vitae turpis viverra pellentesque. Duis feugiat felis ut enim. Phasellus pharetra, sem id porttitor sodales, magna nunc aliquet nibh, nec blandit nisl mauris at pede. Suspendisse risus risus, lobortis eget, semper at, imperdiet sit amet, quam. Quisque scelerisque dapibus nibh. Nam enim. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Nunc ut metus. Ut metus justo, auctor at, ultrices eu, sagittis ut, purus.

Aliquam aliquam.

4.2.1 Subsection 4.2 of section 2 in chapter 4

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

4.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 28.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 28.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 28.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 28, 29.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d). Cited on page/s 28.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d). Cited on page/s 28.

CHAPTER 5

Title of the chapter 5 displayed in the page

Author 1^{1,*}, Author 2^{1,2,*}, Author 3³, Author 4¹, Author 5¹, Author 6¹, Author 7^{2,4,#} and Author 8^{1,#}

First published in: *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).

DOI: [10.1038/s41598-019-55424-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-55424-z)



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. It means that unrestricted use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format are allowed, as long as the original author(s) and the source are appropriately credited, a link to the Creative Commons license is provided, and any changes made are indicated. To view a copy of this license, please visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Liudi Mulyo *et al.*, 2020.

Contributions

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

¹Department X, University 1, City A, Country B. ²Department Y, University 2, City C, Country D.

³Institute E, City F, Country G. ⁴Research Center H, University I, City J, Country K. [#]e-mail: author7@university2.ac.countryD and author8@universityl.countryK

ABSTRACT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

As in Chapter 4. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at (Figure 5.1), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶. For more information, see Appendix B, specifically in Table B.1.

5.1 SECTION 1 IN CHAPTER 5

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac

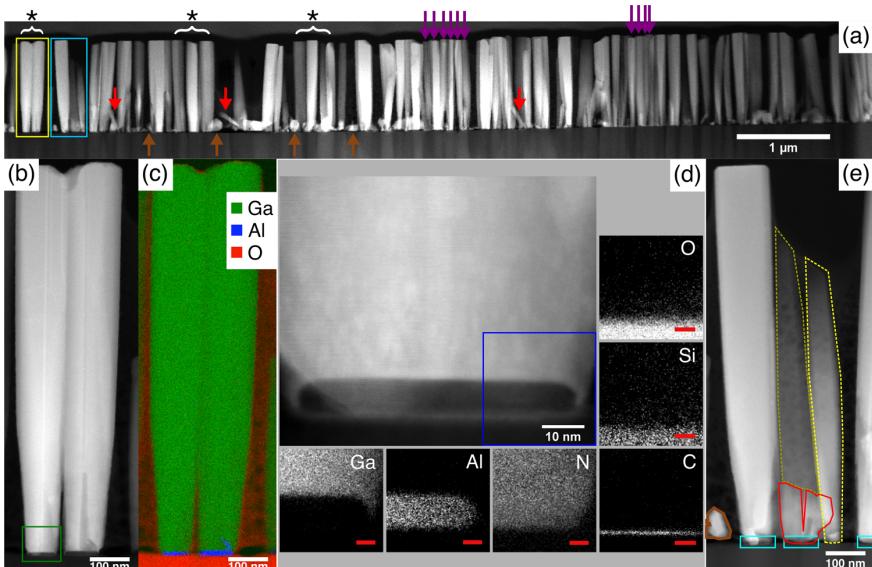


FIGURE 5.1. TEM image of GaN nanocolumn sample synthesized with nominally the same growth conditions as sample G1. (a) Overview cross-sectional HAADF STEM image, showing vertical GaN nanocolumns (star-marked and purple arrows), inclined GaN nanocolumns (red arrows) and GaN crystallites (brown arrows). (b) HAADF STEM image of two GaN nanocolumns within yellow frame in a. (c) Combined color map of the Ga (green), Al (blue) and O (red) elemental distributions (EDS/EELS) on the corresponding region in b. (d) Magnified image of the lower part of the GaN nanocolumn near the interface of the left GaN nanocolumn in b (green frame), with the elemental mapping near the interfaces between the GaN nanocolumn, AlN island, graphene and silica glass (blue frame) by EDS (Ga, Al, Si) and EELS (N, O, C). The red scale bars are 5 nm. (e) HAADF STEM image of the GaN nanocolumns that is light-blue framed in a. The inclined GaN nanocolumn (yellow-dashed line) is possibly directly nucleated on graphene (indicated by the absence of any AlN layer [cyan frames] at the base). There are two broken GaN nanocolumns (red framed area) sharing the same AlN island and another inclined GaN nanocolumn (dark-yellow dashed line) in the background. An irregular GaN crystallite (brown outline) likely grown directly on graphene is also observed (adapted with permission from ref. 4 © Liudi Mulyo et al, 2020).

quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

5.1.1 *Subsection 5.1 of section 1 in chapter 5*

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

5.1.2 Subsection 5.2 of section 1 in chapter 5

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

5.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum. See [Table 5.1](#)

TABLE 5.1. Micro-Raman peak positions, intensities and ratios

Sample	Median D/G ratio	Median G		Median 2D			Median 2D/G ratio
		Position [cm ⁻¹]	Intensity [cps]	Position [cm ⁻¹]	Intensity [cps]	FWHM [cm ⁻¹]	
DLG before MBE growth	1	2	3	4	5	6	7
DLG after MBE growth	1	2	3	4	5	6	7

5.2.1 Subsection 5.2 of section 2 in chapter 5

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

5.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 36.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediately with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 36.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 36.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 36, 37.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 36.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 36.

CHAPTER 6

Title of the chapter 6 displayed in the page

Author 1^{1,*}, Author 2^{1,2,*}, Author 3³, Author 4¹, Author 5¹, Author 6¹, Author 7^{2,4,#} and Author 8^{1,#}

First published in: *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).

DOI: [10.1038/s41598-019-55424-z](https://doi.org/10.1038/s41598-019-55424-z)



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. It means that unrestricted use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format are allowed, as long as the original author(s) and the source are appropriately credited, a link to the Creative Commons license is provided, and any changes made are indicated. To view a copy of this license, please visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© Liudi Mulyo *et al.*, 2020.

Contributions

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

¹Department X, University 1, City A, Country B. ²Department Y, University 2, City C, Country D.

³Institute E, City F, Country G. ⁴Research Center H, University I, City J, Country K. [#]e-mail: author7@university2.ac.countryD and author8@universityl.countryK

ABSTRACT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

As in [Chapter 5](#). Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 6.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶.

6.1 SECTION 1 IN CHAPTER 6

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas

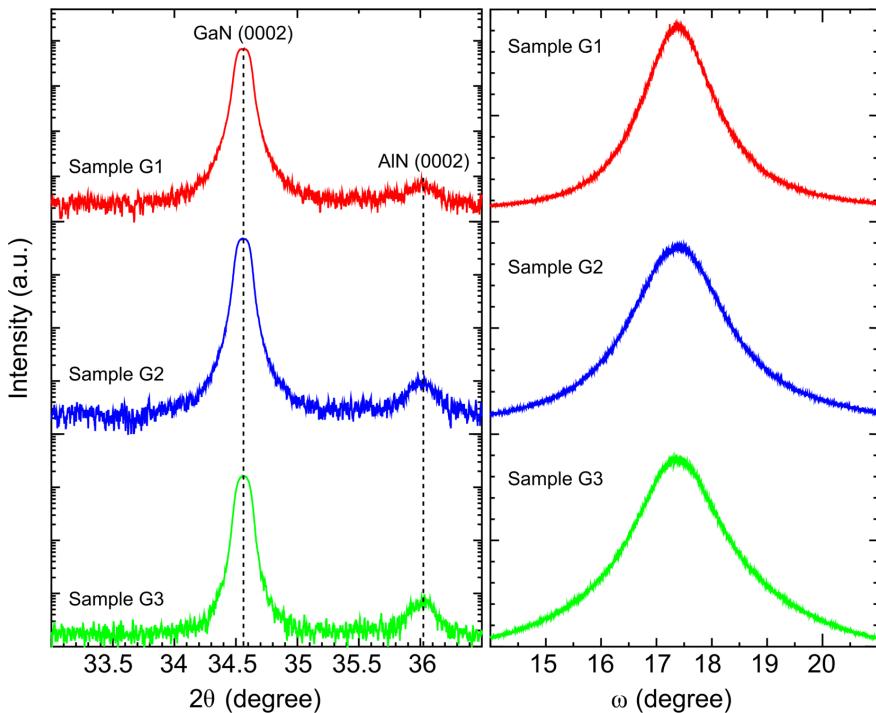


FIGURE 6.1. HRXRD measurements of the nanocolumns. (a) 2θ - ω scanning curve and (b) ω scanning curve of samples G1, G2 and G3 (adapted with permission from ref. 4 © Liudi Mulyo et al, 2020).

lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

6.1.1 *Subsection 6.1 of section 1 in chapter 6*

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos

hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

6.1.2 Subsection 6.2 of section 1 in chapter 6

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

6.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetur tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum. See [Table 6.1](#)

TABLE 6.1. Al-content of each axial nanocolumn segment for the vertical GaN/AlGaN nanocolumn ensemble (top to bottom) obtained from fitting the simulation model to the HRXRD 2θ-ω scan data

Segment	Thickness (nm)	Al bottom (%)	Al top (%)
p-GaN	1	2	3
p-AlGaN (linear grading)	4	5	6
i-GaN quantum disk	7	8	9
n-AlGaN (linear grading)	10	11	12
n-GaN	13	14	15
n-AlN buffer layer	16	17	18

6.2.1 Subsection 6.2 of section 2 in chapter 6

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor. See [Appendix C](#) for the [Figure C.1](#) and [Figure C.2](#).

6.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s [44](#).
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s [44](#).
- [3] I. M. Höiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s [44](#).
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s [44, 45](#).
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s [44](#).
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s [44](#).

Part III

EPILOGUE

CHAPTER 7

Conclusion

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eutellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 1.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶. For [Chapter 4](#) and [Chapter 5](#), as well as [Chapter 6](#)

7.1 SECTION 1 IN CHAPTER 7

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum

pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

7.1.1 Subsection 7.1 of section 1 in chapter 7

Fusce mauris. Vestibulum luctus nibh at lectus. Sed bibendum, nulla a faucibus semper, leo velit ultricies tellus, ac venenatis arcu wisi vel nisl. Vestibulum diam. Aliquam pellentesque, augue quis sagittis posuere, turpis lacus congue quam, in hendrerit risus eros eget felis. Maecenas eget erat in sapien mattis porttitor. Vestibulum porttitor. Nulla facilisi. Sed a turpis eu lacus commodo facilisis. Morbi fringilla, wisi in dignissim interdum, justo lectus sagittis dui, et vehicula libero dui cursus dui. Mauris tempor ligula sed lacus. Duis cursus enim ut augue. Cras ac magna. Cras nulla. Nulla egestas. Curabitur a leo. Quisque egestas wisi eget nunc. Nam feugiat lacus vel est. Curabitur consectetur.

Suspendisse vel felis. Ut lorem lorem, interdum eu, tincidunt sit amet, laoreet vitae, arcu. Aenean faucibus pede eu ante. Praesent enim elit, rutrum at, molestie non, nonummy vel, nisl. Ut lectus eros, malesuada sit amet, fermentum eu, sodales cursus, magna. Donec eu purus. Quisque vehicula, urna sed ultricies auctor, pede lorem egestas dui, et convallis elit erat sed nulla. Donec luctus. Curabitur et nunc. Aliquam dolor odio, commodo pretium, ultricies non, pharetra in, velit. Integer arcu est, nonummy in, fermentum faucibus, egestas vel, odio.

Sed commodo posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

7.1.2 Subsection 7.2 of section 1 in chapter 7

Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Donec odio elit, dictum in, hendrerit sit amet, egestas sed, leo. Praesent feugiat sapien aliquet odio. Integer vitae justo. Aliquam vestibulum fringilla lorem. Sed neque lectus, consectetur at, consectetur sed, eleifend ac, lectus. Nulla facilisi. Pellentesque eget lectus. Proin eu metus. Sed porttitor. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse eu lectus. Ut mi mi, lacinia sit amet, placerat et, mollis vitae, dui. Sed ante tellus, tristique ut, iaculis eu, malesuada ac, dui. Mauris nibh leo, facilisis non, adipiscing quis, ultrices a, dui.

Morbi luctus, wisi viverra faucibus pretium, nibh est placerat odio, nec commodo wisi enim eget quam. Quisque libero justo, consectetur a, feugiat vitae, porttitor eu, libero. Suspendisse sed mauris vitae elit sollicitudin malesuada. Maecenas ultricies eros sit amet ante. Ut venenatis velit. Maecenas sed mi eget dui varius euismod. Phasellus aliquet volutpat odio. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Pellentesque sit amet pede ac sem eleifend consectetur. Nullam elementum, urna vel imperdiet sodales, elit ipsum pharetra ligula, ac pretium ante justo a nulla. Curabitur tristique arcu eu metus. Vestibulum lectus. Proin mauris. Proin eu nunc eu urna hendrerit faucibus. Aliquam auctor, pede consequat laoreet varius, eros tellus scelerisque quam, pellentesque hendrerit ipsum dolor sed augue. Nulla nec lacus.

Suspendisse vitae elit. Aliquam arcu neque, ornare in, ullamcorper quis, commodo eu, libero. Fusce sagittis erat at erat tristique mollis. Maecenas sapien libero, molestie et, lobortis in, sodales eget, dui. Morbi ultrices rutrum lorem. Nam elementum ullamcorper leo. Morbi dui. Aliquam sagittis. Nunc placerat. Pellentesque tristique sodales est. Maecenas imperdiet lacinia velit. Cras non urna. Morbi eros pede, suscipit ac, varius vel, egestas non, eros. Praesent malesuada, diam id pretium elementum, eros sem dictum tortor, vel consectetur odio sem sed wisi.

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetur eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

7.2 SHORT SECTION TITLE IN THE CHAPTER

Sed feugiat. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Ut pellentesque augue sed urna. Vestibulum diam eros, fringilla et, consectetuer eu, nonummy id, sapien. Nullam at lectus. In sagittis ultrices mauris. Curabitur malesuada erat sit amet massa. Fusce blandit. Aliquam erat volutpat. Aliquam euismod. Aenean vel lectus. Nunc imperdiet justo nec dolor.

Etiam euismod. Fusce facilisis lacinia dui. Suspendisse potenti. In mi erat, cursus id, nonummy sed, ullamcorper eget, sapien. Praesent pretium, magna in eleifend egestas, pede pede pretium lorem, quis consectetuer tortor sapien facilisis magna. Mauris quis magna varius nulla scelerisque imperdiet. Aliquam non quam. Aliquam porttitor quam a lacus. Praesent vel arcu ut tortor cursus volutpat. In vitae pede quis diam bibendum placerat. Fusce elementum convallis neque. Sed dolor orci, scelerisque ac, dapibus nec, ultricies ut, mi. Duis nec dui quis leo sagittis commodo.

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien, venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

Nulla in ipsum. Praesent eros nulla, congue vitae, euismod ut, commodo a, wisi. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Aenean nonummy magna non leo. Sed felis erat, ullamcorper in, dictum non, ultricies ut, lectus. Proin vel arcu a odio lobortis euismod. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Proin ut est. Aliquam odio. Pellentesque massa turpis, cursus eu, euismod nec, tempor congue, nulla. Duis viverra gravida mauris. Cras tincidunt. Curabitur eros ligula, varius ut, pulvinar in, cursus faucibus,

augue.

Nulla mattis luctus nulla. Duis commodo velit at leo. Aliquam vulputate magna et leo. Nam vestibulum ullamcorper leo. Vestibulum condimentum rutrum mauris. Donec id mauris. Morbi molestie justo et pede. Vivamus eget turpis sed nisl cursus tempor. Curabitur mollis sapien condimentum nunc. In wisi nisl, malesuada at, dignissim sit amet, lobortis in, odio. Aenean consequat arcu a ante. Pellentesque porta elit sit amet orci. Etiam at turpis nec elit ultricies imperdiet. Nulla facilisi. In hac habitasse platea dictumst. Suspendisse viverra aliquam risus. Nullam pede justo, molestie nonummy, scelerisque eu, facilisis vel, arcu.

Curabitur tellus magna, porttitor a, commodo a, commodo in, tortor. Donec interdum. Praesent scelerisque. Maecenas posuere sodales odio. Vivamus metus lacus, varius quis, imperdiet quis, rhoncus a, turpis. Etiam ligula arcu, elementum a, venenatis quis, sollicitudin sed, metus. Donec nunc pede, tincidunt in, venenatis vitae, faucibus vel, nibh. Pellentesque wisi. Nullam malesuada. Morbi ut tellus ut pede tincidunt porta. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam congue neque id dolor.

Donec et nisl at wisi luctus bibendum. Nam interdum tellus ac libero. Sed sem justo, laoreet vitae, fringilla at, adipiscing ut, nibh. Maecenas non sem quis tortor eleifend fermentum. Etiam id tortor ac mauris porta vulputate. Integer porta neque vitae massa. Maecenas tempus libero a libero posuere dictum. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae; Aenean quis mauris sed elit commodo placerat. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Vivamus rhoncus tincidunt libero. Etiam elementum pretium justo. Vivamus est. Morbi a tellus eget pede tristique commodo. Nulla nisl. Vestibulum sed nisl eu sapien cursus rutrum.

Nulla non mauris vitae wisi posuere convallis. Sed eu nulla nec eros scelerisque pharetra. Nullam varius. Etiam dignissim elementum metus. Vestibulum faucibus, metus sit amet mattis rhoncus, sapien dui laoreet odio, nec ultricies nibh augue a enim. Fusce in ligula. Quisque at magna et nulla commodo consequat. Proin accumsan imperdiet sem. Nunc porta. Donec feugiat mi at justo. Phasellus facilisis ipsum quis ante. In ac elit eget ipsum pharetra faucibus. Maecenas viverra nulla in massa.

7.2.1 Subsection 7.2 of section 2 in chapter 7

Aliquam lectus. Vivamus leo. Quisque ornare tellus ullamcorper nulla. Mauris porttitor pharetra tortor. Sed fringilla justo sed mauris. Mauris tellus. Sed non leo. Nullam elementum, magna in cursus sodales, augue est scelerisque sapien,

venenatis congue nulla arcu et pede. Ut suscipit enim vel sapien. Donec congue. Maecenas urna mi, suscipit in, placerat ut, vestibulum ut, massa. Fusce ultrices nulla et nisl.

Etiam ac leo a risus tristique nonummy. Donec dignissim tincidunt nulla. Vestibulum rhoncus molestie odio. Sed lobortis, justo et pretium lobortis, mauris turpis condimentum augue, nec ultricies nibh arcu pretium enim. Nunc purus neque, placerat id, imperdiet sed, pellentesque nec, nisl. Vestibulum imperdiet neque non sem accumsan laoreet. In hac habitasse platea dictumst. Etiam condimentum facilisis libero. Suspendisse in elit quis nisl aliquam dapibus. Pellentesque auctor sapien. Sed egestas sapien nec lectus. Pellentesque vel dui vel neque bibendum viverra. Aliquam porttitor nisl nec pede. Proin mattis libero vel turpis. Donec rutrum mauris et libero. Proin euismod porta felis. Nam lobortis, metus quis elementum commodo, nunc lectus elementum mauris, eget vulputate ligula tellus eu neque. Vivamus eu dolor.

7.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s 53.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediated with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s 53.
- [3] I. M. Hoiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s 53.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s 53.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 53.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s 53.



APPENDIX A

Supporting information for chapter 4

A.1 DETAILED GROWTH INFORMATION

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus et tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 4.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶.

TABLE A.1. Detailed growth conditions of nanocolumns

Nanocolumn segment/layer	Growth temperature, pyrometer reading (°C)	Beam equivalent pressure (Pa)			Si cell temperature (°C)	N ₂ flow rate/plasma emission (sccm/mV)	Growth time (sec)
		Al	Ga	Mg			
Al seeding with Si	1	2.0 × 10 ⁻³	-	-	4	-	5
Nitridation	6	-	-	-	-	7.00/8.9	1
n-AlN	2	3.0 × 10 ⁻⁴	-	-	5	6.00/7.89	1
n-GaN	2	-	3.4 × 10 ⁻⁵	-	6	7.89/1.23	4
n-Al _{0.56} Ga _{0.78} N	9	1.2 × 10 ⁻³	4.0 × 10 ⁻⁵	-	6	7.00/8.9	1
i-GaN	2	-	3.1 × 10 ⁻²	-	-	3.45/6.78	9
p-Al _{1.23} Ga _{4.56} N	7	8.9 × 10 ⁻¹	2.0 × 10 ⁻³	4.0 × 10 ⁻⁵	-	6.00/7.89	1
p-GaN	2	-	3.0 × 10 ⁻⁴	5.0 × 10 ⁻⁶	-	7.00/8.9	1

A.2 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. **Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy.** *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s A-1.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. **Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediately with a thin AlN buffer layer.** *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s A-1.
- [3] I. M. Høiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. **GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode.** *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s A-1.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. **The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene.** *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s A-1.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* **The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene.** *Unpublished* (n.d). Cited on page/s A-1.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* **Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns.** *Unpublished* (n.d). Cited on page/s A-1.

APPENDIX B

Supporting information for chapter 5

B.1 ADDITIONAL MICRO-RAMAN SPECTROSCOPY MEASUREMENTS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit¹. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis ¹. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque². Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas ². Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem³. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat ³. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum⁴. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at ([Figure 5.1](#)), mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla ⁴. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum¹⁻⁶.

TABLE B.1. Summary of micro-Raman spectroscopy measurements for the as-grown nanocolumn sample carried out in different areas (of the same sample) from what is presented in [Figure C.2](#). The table shows the median values of the D peak, G peak, and 2D peak, for the entire mapping (123 measurements), from the green patches (45 measurements), and from the purple areas (67 measurements).

Median value	Area (number of measurements)	Position [cm ⁻¹]	Intensity [cps]	FWHM [cm ⁻¹]	Intensity ratio to G peak
D peak	Green patches (45)	1	2	3	4
	Full map (123)	5	6	7	8
	Purple areas (67)	9	1	2	3
G peak (*)	Green patches (45)	4	5	-	-
	Full map (123)	6	7	-	-
	Purple areas (67)	8	9	-	-
2D peak	Green patches (45)	1	2	3	4
	Full map (123)	5	6	7	8
	Purple areas (67)	9	1	2	3
D' peak (**)	Green patches (45)	4	5	-	6

B.2 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, Y. Konno, J. S. Nilsen, A. T. J. van Helvoort, B.-O. Fimland, H. Weman, and K. Kishino. [Growth study of self-assembled GaN nanocolumns on silica glass by plasma assisted molecular beam epitaxy](#). *Journal of Crystal Growth* **480**, 67–73 (2017). Cited on page/s A-5.
- [2] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, H. Kuroe, P.-E. Vullum, H. Weman, B.-O. Fimland, and K. Kishino. [Vertical GaN nanocolumns grown on graphene intermediately with a thin AlN buffer layer](#). *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018). Cited on page/s A-5.
- [3] I. M. Høiaas, A. Liudi Mulyo, P. E. Vullum, D.-C. Kim, L. Ahtapodov, B.-O. Fimland, K. Kishino, and H. Weman. [GaN/AlGaN Nanocolumn Ultraviolet Light-Emitting Diode Using Double-Layer Graphene as Substrate and Transparent Electrode](#). *Nano Letters* **19** (3), 1649–1658 (2019). Cited on page/s A-5.
- [4] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s A-5.
- [5] A. Liudi Mulyo *et al.* [The Influence of AlN Buffer Layer on the Growth of Self-Assembled GaN Nanocolumns on Graphene](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s A-5.
- [6] A. Liudi Mulyo *et al.* [Utilization of Graphene as Substrate and Bottom Electrode for High-Density and Vertically-Aligned GaN/AlGaN Nanocolumns](#). *Unpublished* (n.d.). Cited on page/s A-5.

APPENDIX C

Supplementary information for chapter 6

C.1 MICRO-PHOTOLUMINESCENCE SPECTRA OF HVPE-GAN AND NANOCOLUMN SAMPLES

This is an additional characterization from Subsection 6.2.1.

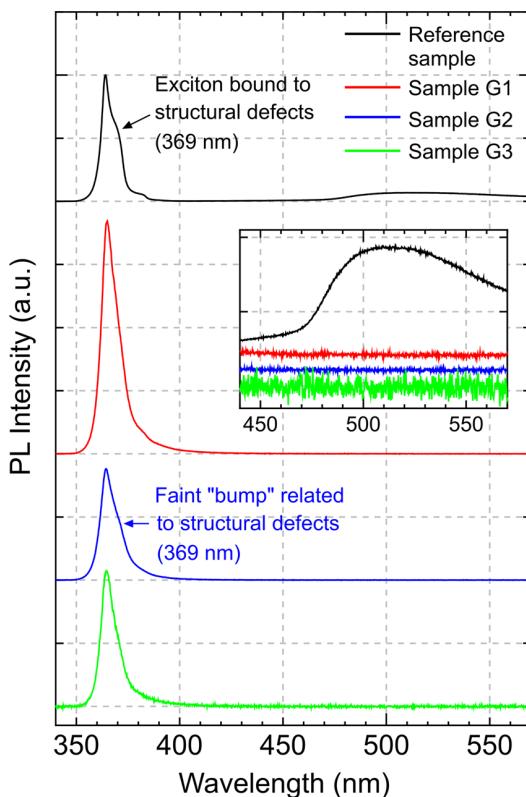


FIGURE C.1. RT micro-photoluminescence spectra of reference sample (HVPE-freestanding GaN), samples G1, G2 and G3. Inset shows the magnified spectra in the wavelength range from 440 to 570 nm, highlighting the presence of broad green and yellow emission band in the reference sample (adapted with permission from ref. 1 © Liudi Mulyo et al, 2020).

C.2 MICRO-RAMAN SPECTRA OF PRISTINE GRAPHENE AND NANOCOLUMN SAMPLES AFTER GROWTH

This is an extra measurement from subsection 6.2.1

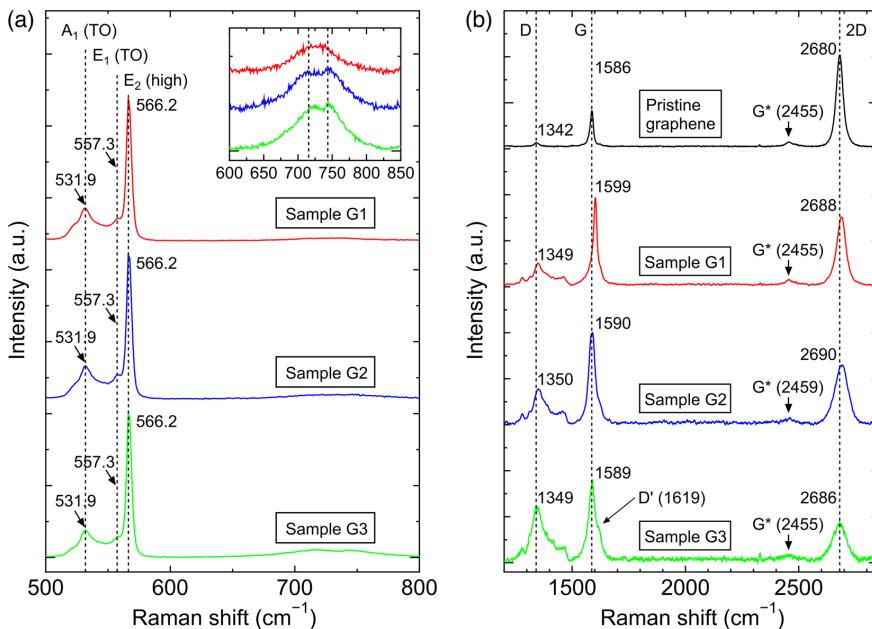


FIGURE C.2. Micro-Raman spectroscopy of the nanocolumn samples, including the graphene for each respective sample. Raman spectra of (a) samples G1, G2 and G3 between 500 and 800 cm⁻¹, with the peak frequencies of the A₁ (TO), E₁ (TO) and E₂ (high) modes indicated by vertical dashed lines (inset: magnification from 600 to 850 cm⁻¹, with the identified peak frequencies at 715 and 743 cm⁻¹ of the possible SO and LPP modes, respectively^{2,3}, indicated by vertical dashed lines), and (b) pristine graphene, samples G1, G2 and G3 between 1100 and 3200 cm⁻¹. The dashed lines indicate D, G and 2D peak positions of pristine graphene (adapted with permission from ref. 1 © Liudi Mulyo et al, 2020).

C.3 REFERENCES

- [1] A. Liudi Mulyo, M. K. Rajpalke, P. E. Vullum, H. Weman, K. Kishino, and B.-O. Fimland. **The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene.** *Scientific Reports* **10** (1), 853 (2020). Cited on page/s [A-7](#), [A-8](#).
- [2] L. H. Robins, E. Horneber, N. A. Sanford, K. A. Bertness, M. D. Brubaker, and J. B. Schlager. **Raman spectroscopy based measurements of carrier concentration in n-type GaN nanowires grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy.** *Journal of Applied Physics* **120** (12), 124313 (2016). Cited on page/s [A-8](#).
- [3] K. Jegannathan, R. K. Debnath, R. Meijers, T. Stoica, R. Calarco, D. Grutzmacher, and H. Luth. **Raman scattering of phonon-plasmon coupled modes in self-assembled GaN nanowires.** *Journal of Applied Physics* **105** (12), 123707 (2009). Cited on page/s [A-8](#).

CURRICULUM VITAE

Author

PERSONAL INFORMATION

Family name, given name : Author
Nationality : Citizenship
Place, date of birth : City (Country), Month date^{st/nd/rd/th}, yyyy
Current address : Address, Postal code City, NO

EDUCATIONAL BACKGROUND AND RESEARCH EXPERIENCE

Doctor of Philosophy (Ph.D.) in Electronic Systems

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, NO
month yyyy - month 2021

- ▶ Thesis title: The title of PhD thesis
- ▶ Advisors: Professor Supervisor and Professor Co-supervisor
- ▶ Additional information, like collaborative researcher at another Laboratory (name of the Professor) at University X, City, Country for total of xx months

Master of Science (M.Sc.) in Condensed Matter Physics

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, NO
month yyyy - month 2013

- ▶ Thesis title: The title of MSc thesis
- ▶ Advisors: Professor Supervisor and Professor Co-supervisor

Bachelor of Engineering (B.Eng.) in Engineering Physics

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, NO
month yyyy - month 2010

- ▶ Thesis title: The title of BEng thesis
- ▶ Advisors: Professor Supervisor and Professor Co-supervisor

TEACHING EXPERIENCE

Laboratory assistant for various courses, at **NTNU**: Nanoelectronics 2 (spring 2020 & 2021), Semiconductor Physics with Lab (spring 2017-2020), Physical Methods for Nanostructuring and Characterization (autumn 2017 & 2018), Chemical Methods for Synthesis and Characterization of Nanomaterial (autumn 2017 & 2018).

AWARDS

- Norges tekniske høgskoles fond, a travel grant for **ISSLED 2017** 2017
- NorFab travel grant for **MBE 2016** and **CSW 2017** 2017-2018
- NorFab project support, for research visit in University X 2018-2019
- PhD scholarship, NTNU 2017-2021

SKILLS

Scientific (laboratory) competency

- Experienced with the growth of semiconductor using molecular beam epitaxy technique.
- Skilled for material characterization techniques using scanning electron microscopy, photoluminescence, and Raman spectroscopy.
- Familiar with device fabrication tools, including mask/maskless aligner, e-beam/sputter deposition, plasma-enhanced chemical vapor deposition, wet etching, and inductively-coupled plasma reactive ion etching.
- Basic knowledge of e-beam lithography and X-ray diffraction.

Computer literacy

- Microsoft Windows, MacOS, and Debian-based Linux (competent)
- Microsoft Office, Inkscape, ImageJ, Ngraph, and L^AT_EX (intermediate)
- SketchUp, Blender, Python, MatLab, C++, HTML, and LabView (beginner)

Language fluency

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| ► Indonesia (native) | ► Japanese (elementary) |
| ► English (full professional) | ► Norwegian (elementary) |

CONTACT INFORMATION

- | | | |
|----------|---|---|
| E-mail | : | author@outlook.com |
| Homepage | : | https://author.github.io |

Dissemination of research

PUBLICATIONS IN PEER REVIEWED JOURNALS

- [1] **Author 1**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, and Author 7. *Title of the paper*. *Journal of Crystal Growth* **480**, 67-73 (2017).
- [2] **Author 1**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, and Author 7. *Title of paper 2*. *Nanotechnology* **30** (1), 015604 (2018).
This article was chosen as cover image/featured article, see Figure D.1.
- [3] Author 1*, **Author 2***, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, Author 7, and Author 8. *Title of paper 3*. *Nano Letters* **19** (3), 1649-1658 (2019).
***equal contributions**
- [4] **Author 1**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, and Author 6. *Title of paper 4*. *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).

MANUSCRIPT UNDER REVIEW

- [1] **Author 1**, Author 2*, Author 3*, Author 4, Author 5, Author 6, Author 7, Author 8, Author 9, and Author 10. *Title of manuscript*.
***equal contributions**

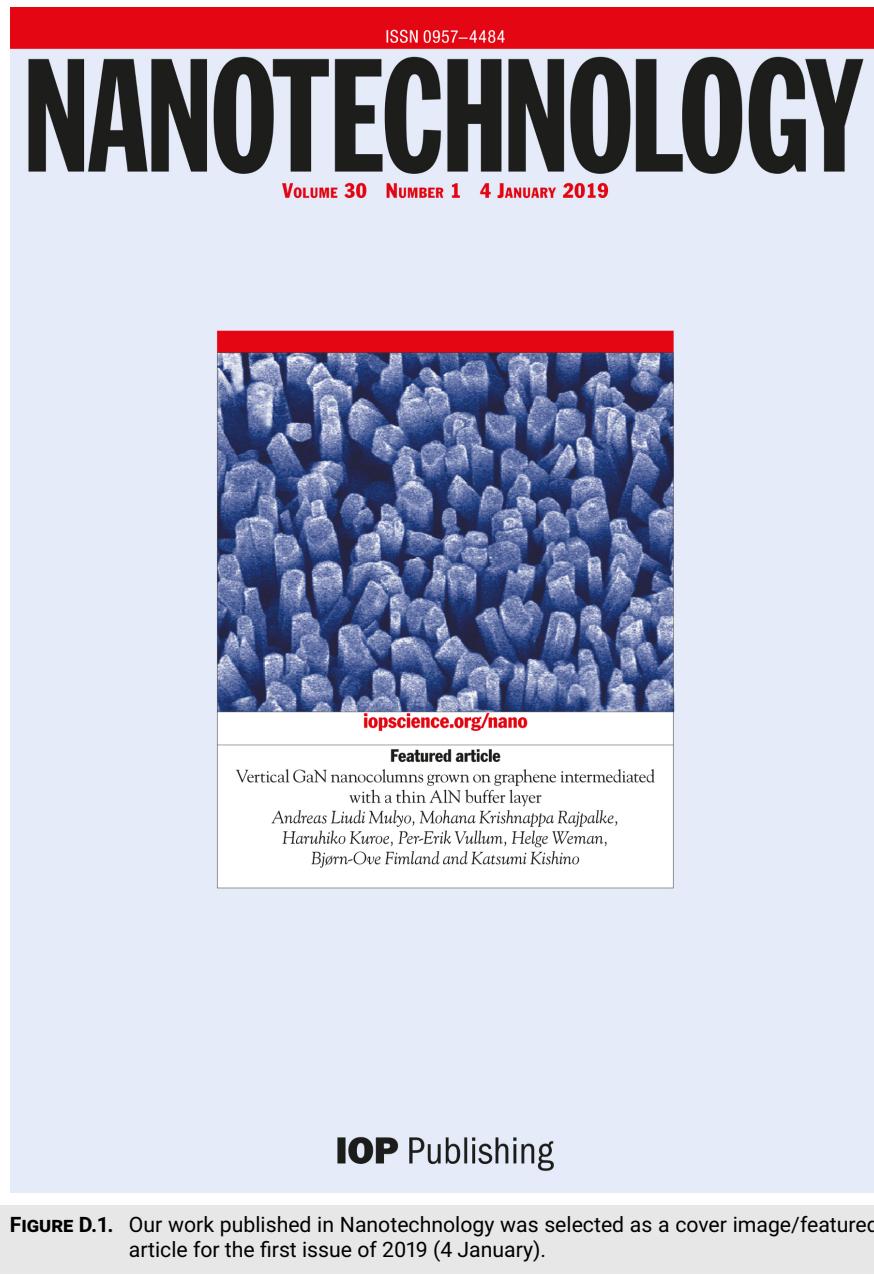


FIGURE D.1. Our work published in Nanotechnology was selected as a cover image/featured article for the first issue of 2019 (4 January).

CONFERENCE PARTICIPATION (PRESENTATIONS)

Name of the author with [†] indicates the presenter. Half of the past meeting records (i.e., conference websites or pdf files of the conference programs) are still accessible online, and unfortunately half of them are no longer active (as of December 03 2020). For the latter, reader might notice that they are linked via [Internet Archive](#) or [my personal website](#).

- [1] **Author 1[†]**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, and Author 6. *Title of the conference*. Contributed talk at [The 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices \(ISSLED 2017\)](#), Banff, Canada, October 08-12 2017.
- [2] Author 1[†], **Author 2**, Author 3, Author 4, Author 5, and Author 6. *Title of the conference*. Contributed talk at [Nano@NTNU Symposium](#), Trondheim, Norway, December 06-07 2017.
- [3] **Author 1[†]**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, and Author 6. *Title of the conference*. Poster presentation at [Nano@NTNU Symposium](#), Trondheim, Norway, December 06-07 2017.
No website or pdf file of the conference program is associated with this item.
- [4] Author 1[†], **Author 2**, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, Author 7, and Author 8. *Title of the conference*. Contributed talk at [Nanowire Week](#), Hamilton, Canada, June 11-15 2018.
- [5] Author 1, **Author 2**, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, Author 7, and Author 8[†]. *Title of the conference*. Poster presentation at [The International Workshop on Nitride Semiconductors](#), Kanazawa, Japan, November 11-16 2018.
- [6] **Author 1**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6[†], and Author 7. *Title of the conference*. Poster presentation at [The International Workshop on Nitride Semiconductors](#), Kanazawa, Japan, November 11-16 2018.
- [7] **Author 1[†]**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, Author 6, and Author 7. *Title of the conference*. Contributed talk at [The 10th annual workshop of Norwegian PhD Network on Nanotechnology for Microsystems](#), Tromsø, Norway, June 17-19 2019.
- [8] **Author 1**, Author 2, Author 3, Author 4, Author 5, and Author 6[†]. *Title of the conference*. Poster presentation at [The 13th International Conferences on Nitride Semiconductors](#), Bellevue, Washington (Seattle), USA, July 07-12 2019.

Copyright permissions

Below is the complete list of the copyright figures shown in this Doctoral thesis, mainly from chapter 1 to chapter 4.

- § [Figure 1.1¹](#) is adapted with permission from: ¹page 4
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure 2.1²](#) is adapted with permission from: ²page 12
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure 3.1³](#) is adapted with permission from: ³page 19
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure 4.1⁴](#) is adapted with permission from: ⁴page 29
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure 5.1⁵](#) is adapted with permission from: ⁵page 37
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure 6.1⁶](#) is adapted with permission from: ⁶page 45
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.
- § [Figure C.1⁷](#) is adapted with permission from: ⁷page A-7
A. Liudi Mulyo. [The influence of AlN buffer layer on the growth of self-assembled GaN nanocolumns on graphene](#). *Scientific Reports* **10**, 853 (2020).
Copyright © 2020 Liudi Mulyo.

Index

D

dictum, 3, 11, 19, 28, 36, 44, 53, A-1,
A-5

E

egestas, 3, 11, 19, 28, 36, 44, 53, A-1,
A-5

L

Lorem, 3, 11, 19, 28, 36, 44, 53, A-1,

A-5

M

MEE cycles
different AlN, 12

P

purus, 3, 11, 19, 28, 36, 44, 53, A-1,
A-5

COLOPHON

This thesis was typeset using L^AT_EX and the book documentclass. Main text is contained within the dimension of 115 mm (width)/197.2 mm (length), where the horizontal (top:bottom) and vertical (left:right) margin ratios are 1:1. The width of the margin notes is 12 mm. Style of this thesis is inspired by Friedrich Wiemer's thesis *Security Arguments and Tool-based Design of Block Ciphers* [<https://hss-opus.ub.rub.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/7044/file/diss.pdf>].

Sebastian Kosch's *Crimson* [<https://github.com/skosch/Crimson>] is set as the running text (11 pt) typeface. Matthew Carter's *Charter* acts as the title (14.4 pt), section (10 pt), subsection (10 pt), and header (8 pt) typefaces. Hermann Zapf's *Palatino* serves as the page (9 pt) typeface. Christian Robertson's *Roboto* [<https://tug.org/FontCatalogue/roboto/>] is utilized for the figure caption (8 pt) typeface. Libertine Open Fonts Project's *Linux Libertine* [<https://tug.org/FontCatalogue/linuxlibertine/>] and Linus Romer's *Miama Nueva* [<https://tug.org/FontCatalogue/miamanueva/>] are used for math/equation (11 pt) and calligraphical (14.4 pt) typefaces. The *textgreek* package [<https://www.ctan.org/pkg/textgreek>] provides Greek letters in normal font (being not *italicized* as in \$math\$ mode).

Six different color palettes exploited throughout this thesis are listed as follows: RGB: 0, 80, 158 , RGB: 125, 0, 45 , RGB: 255, 248, 220 , RGB: 231, 231, 231 , RGB: 0, 65, 120 , and RGB: 128, 128, 128 .

The references were processed by BibTeX/natbib -backref option enabled-with modified unsrtnat bibliography style. Further details on the packages utilized to make this thesis, along with the L^AT_EX source (template) of this thesis can be found on <https://andreasliudimulyo.github.io/#latex>.

Most of the graphics in this thesis were generated using Inkscape [<https://inkscape.org>] and Ngraph [<https://forest.watch.impress.co.jp/library/software/ngraph/>].

Final Version as of Tuesday 10th August, 2021 at 19:24:41.