

Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

Объявленные ранее цели Проекта

1. Исследование влияния резонансного поглощения света (резонансы Ми) на эффективность терагерцовой генерации в ННК на основе полупроводниковых соединений АЗВ5.
2. Продолжение исследований временной динамики изменения эффективности генерации ТГц излучения при возбуждении ННК оптическими фемтосекундными импульсами.
3. Продолжение исследований временной динамики волновых форм ТГц импульса при возбуждении ННК оптическими фемтосекундными импульсами.

Полученные в 2015 году важнейшие результаты

1. Проведены экспериментальные и теоретические исследования процесса генерации терагерцового излучения периодическими массивами полупроводниковых нитевидных нанокристаллов на основе GaAs при возбуждении сверхкороткими оптическими импульсами. Нитевидные нанокристаллы выращивались на подложках GaAs с кристаллографической ориентацией (111)В методом газовой фазной эпитаксии из металл-органических соединений (ГФЭМО). Синтез осуществлялся методом селективного роста. Фактический диаметр нанопроводов составлял 80 нм и 160 нм. Размеры упорядоченного массива нанопроводов с заданной плотностью составляли 200x200 мкм. На рис. 1

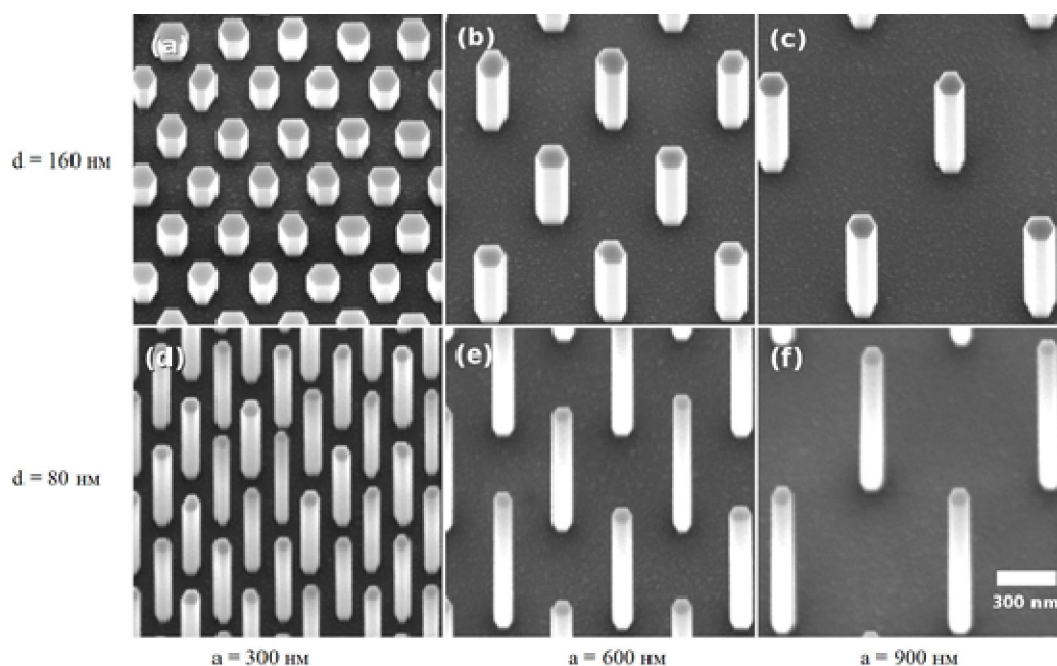


Рис. 1. СЭМ - изображения массивов ННК под углом 20°. Верхний ряд (a-c) – диаметр ННК составляет 160 нм, нижний ряд (d-f) – 80 нм. Расстояние между ННК: массивы a, d – 300 нм; b, e – 600 нм; c, f – 900 нм.

представлены СЭМ-изображения упорядоченных массивов ННК на основе GaAs. Эксперименты выполнялись с помощью техники времяразрешённой спектроскопии – регистрировались амплитуда электрического поля ТГц волны и её фаза. В качестве системы регистрации ТГц импульса использовалась система электрооптического стробирования, на основе кристалла теллурида цинка. В качестве источника оптического излучения использовался фемтосекундный Ti:S лазер, генерирующий световые импульсы

длительностью 15 фс с частотой повторения 80 МГц. Центральная длина волны светового импульса составляла 795 нм. Для определения конкретного механизма, обуславливающего генерацию ТГц излучения в полупроводниковом нанопроводе были проведены эксперименты по регистрации волновых форм ТГц импульсов для массивов с различной геометрией.

На рис.2 представлены волновые формы ТГц импульса, полученные при возбуждении массивов ННК с диаметром ~ 160 нм и различной плотностью нанопроводов. На вставке указаны расстояния между нанопроводами – a , и их высота – h .

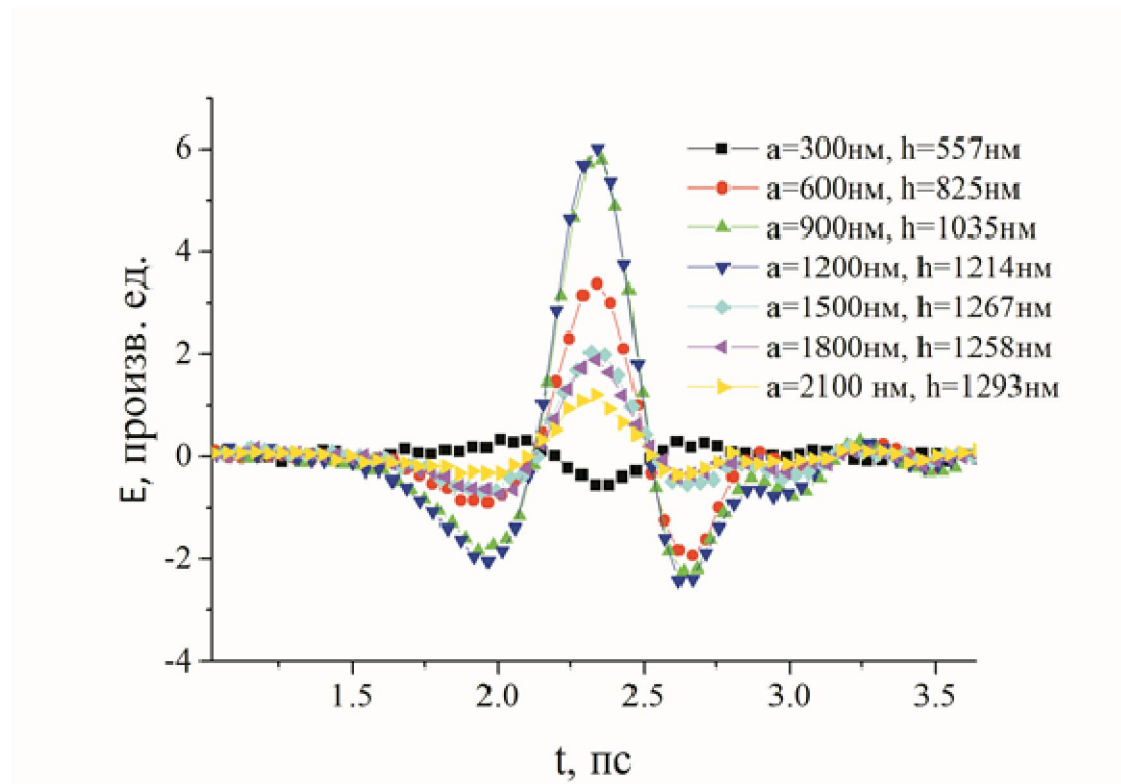


Рис. 2. Волновые формы ТГц импульса, полученные при возбуждении массивов ННК с диаметром ~ 160 нм и с различной плотностью нанопроводов.

Указанные массивы размещены на одной подложке, тем не менее высоты нанопроводов для разных массивов (участков) оказались разные. Из рис. 2 видно, что максимальная амплитуда электрического поля ТГц импульса достигается при генерации электромагнитного излучения массивом ННК при $a = 1200$ нм. Эффективность генерации уменьшается как при увеличении расстояния между нанопроводами, так и при уменьшении. Обращает на себя внимание факт инверсии знака напряженности электрического поля при генерации ТГц излучения от массива ННК, когда высота нанопроводов имеет значение порядка 500 нм. При исследовании других массивов ННК, состоящих из нанопроводов с диаметром 80 нм, этот эффект подтвердился – при высоте нанопровода порядка 600 нм и менее знак ТГц поля менялся. Отметим, что знак ТГц поля при возбуждении поверхности подложки объемного р-GaAs имел такую же полярность, но амплитуда поля была значительно меньше.

Для дальнейшего исследования процесса генерации ТГц излучения необходимо в первую очередь экспериментально определить зависимость максимальной амплитуды ТГц поля, генерируемого массивом ННК одинаковой высоты, от величины фактора заполнения нанопроводами. Подобная зависимость была получена для массива ННК с диаметром $d=$

80 нм и высотой $h \sim 1100$ нм (см. рис. 3). Из полученных данных следует, что максимальная эффективность

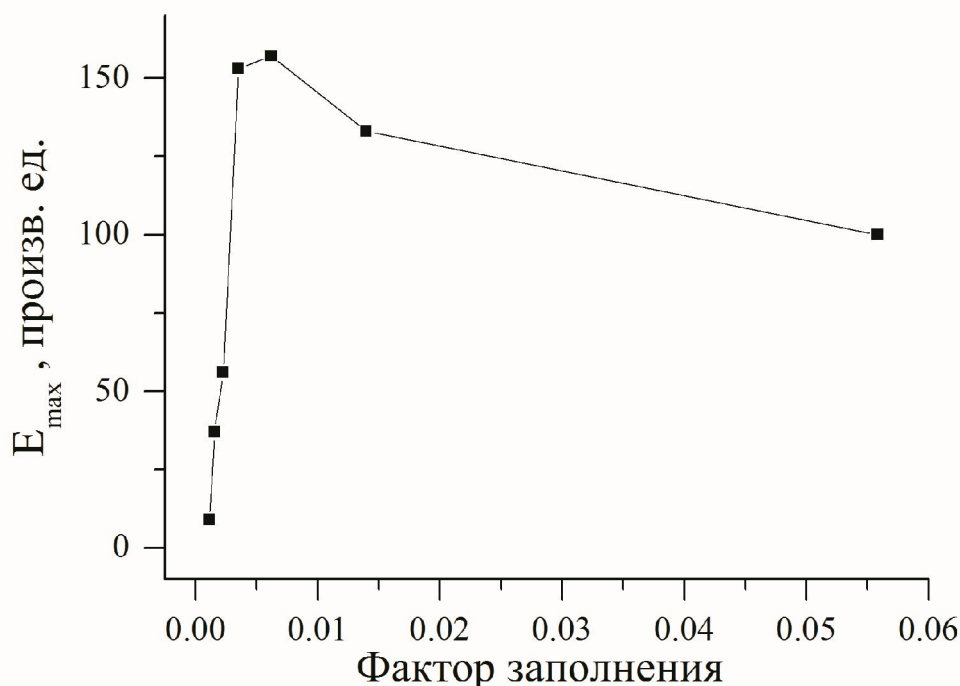


Рис.3. Зависимость максимальной амплитуды ТГц поля от фактора заполнения.

генерации ТГц излучения наблюдается при расстоянии между нанопроводами порядка длины волны возбуждающего света (λ). При $a > \lambda$, как видно на рис. 3, наблюдается линейная зависимость. Это свидетельствует о том, что в этом случае эффективность ТГц генерации пропорциональна плотности нанопроводов. Таким образом, в волновой зоне регистрируется ТГц поле, которое является суммой вкладов электромагнитного излучения от каждого нанопровода и, соответственно, параметры ТГц импульса будут определяться процессом ТГц генерации от одиночного нанопровода.

Также, из рис. 3 следует, что при $a < \lambda$ ТГц поле, генерируемое массивом ННК- убывает. Убывание, на экспериментальной зависимости ТГц поля от фактора заполнения нанокристаллов (Рис.3), по-видимому, можно объяснить возрастанием взаимодействия между точечными диполями. Необычными оказались результаты поляризационных исследований процесса генерации ТГц излучения в ННК. Оказалось, что при определенных параметрах ННК и возбуждающего света, эффективность ТГц генерации становится больше при поляризации возбуждающего оптического излучения, направленной перпендикулярно оси нанопровода. На рис.4 представлены зависимости соотношения между максимальными амплитудами ТГц импульса для ТМ и ТЕ-поляризаций возбуждающего излучения от расстояния между нанопроводами. Угол падения возбуждающего света составлял 45° . Согласно полученным данным, при $a > \lambda$, максимальная амплитуда ТГц поля, генерируемого от массива ННК с диаметром $d=160$ нм, для ТЕ-поляризации примерно в два раза больше, чем для ТМ-поляризации. Тем не менее, для массива ННК с диаметром $d=80$ нм соответствующие соотношения амплитуд ТГц полей прямо противоположно. Кроме того, величина ТГц поля для массива ННК с диаметром $d=160$ нм значительно больше, чем для массива ННК с диаметром $d=80$ нм. Эти экспериментальные результаты хорошо описываются в рамках теории, связанной с

возбуждением цилиндрических мод при наклонном падении света на диэлектрический цилиндр. В работах [1,2], основанных на использовании теории Лоренца-Ми, было

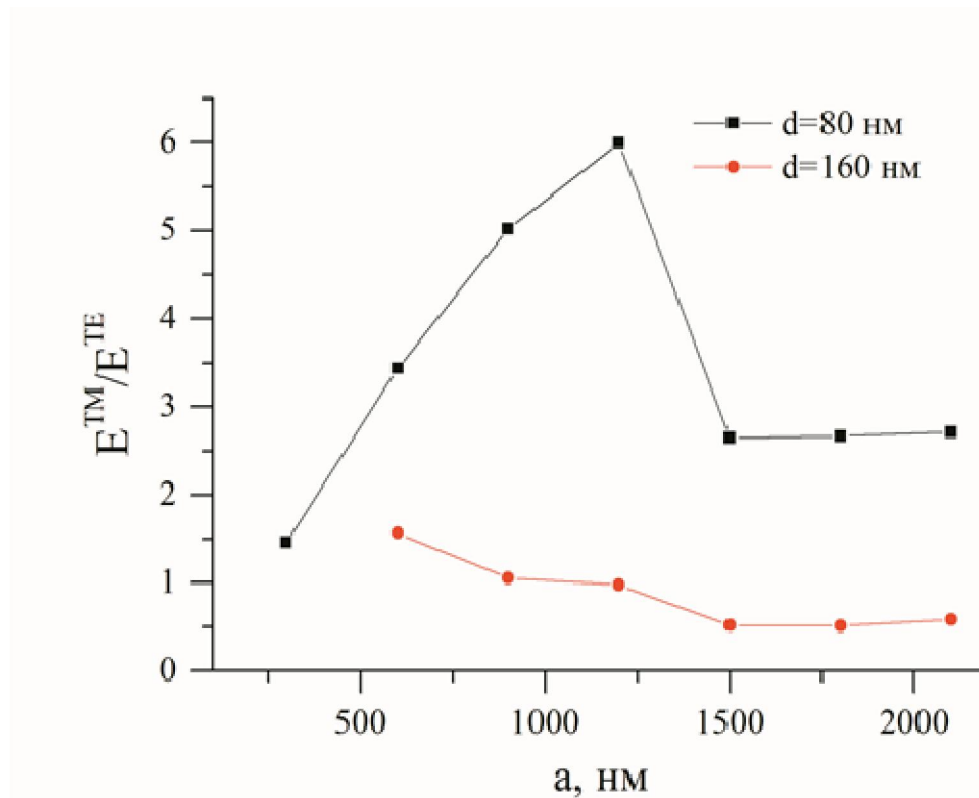


Рис.4. Зависимость соотношения между максимальными амплитудами ТГц импульса для ТМ и ТЕ-поляризации возбуждающего света от расстояния между нанопроводами.

показано, что при падении плоской электромагнитной волны на неограниченный диэлектрический цилиндр происходит резонансное возбуждение цилиндрических мод. В случае поглощающей среды, поглощение света будет происходить также резонансно. Поэтому амплитуда поля внутри цилиндра при определенных условиях может на порядки превышать значение падающего поля. Отметим, что подобное резонансное поглощение наблюдалось в работе [3] при исследовании фотовольтаических свойств структур на основе ННК GaAs. Используя данные для комплексного показателя преломления GaAs, было вычислено сечение поглощения света при наклонном падении на цилиндр. На рис.5 представлена расчетная зависимость сечения поглощения света от величины kr при угле падения 45° . Из рис.5 видно, что поглощение света примерно в два раза больше для ТЕ поляризации по сравнению с ТМ поляризацией, при значении $kr=0.63$ ($d=160$ нм). При $kr=0.31$ ($d=80$ нм) наблюдается противоположная картина. Величина ТГц поля, генерируемого в процессе движения неравновесных носителей заряда в поверхностном или приложенном электрическом поле пропорциональна концентрации фотовозбужденных носителей заряда [4]. Соответственно, значение ТГц поля будет коррелировать с величиной поглощения света. Таким образом, экспериментальные результаты, приведенные на рис.4, действительно можно описать в рамках процесса возбуждения цилиндрических мод в нанопроводе (так называемые резонансы Ми). Кроме того, в рамках этого механизма, можно объяснить экспериментальные результаты, связанные с определением максимальной эффективности генерации ТГц излучения массивом ННК. Действительно, при увеличении плотности нанопроводов, или, как уже было отмечено выше – точечных диполей, их взаимодействие между собой можно описать путем ввода эффективного показателя преломления среды. Тогда при росте

эффективного показателя преломления, в случае когда $a < \lambda$ – будет наблюдаться красный сдвиг резонансной частоты возбуждаемой волновой моды и величина поля внутри

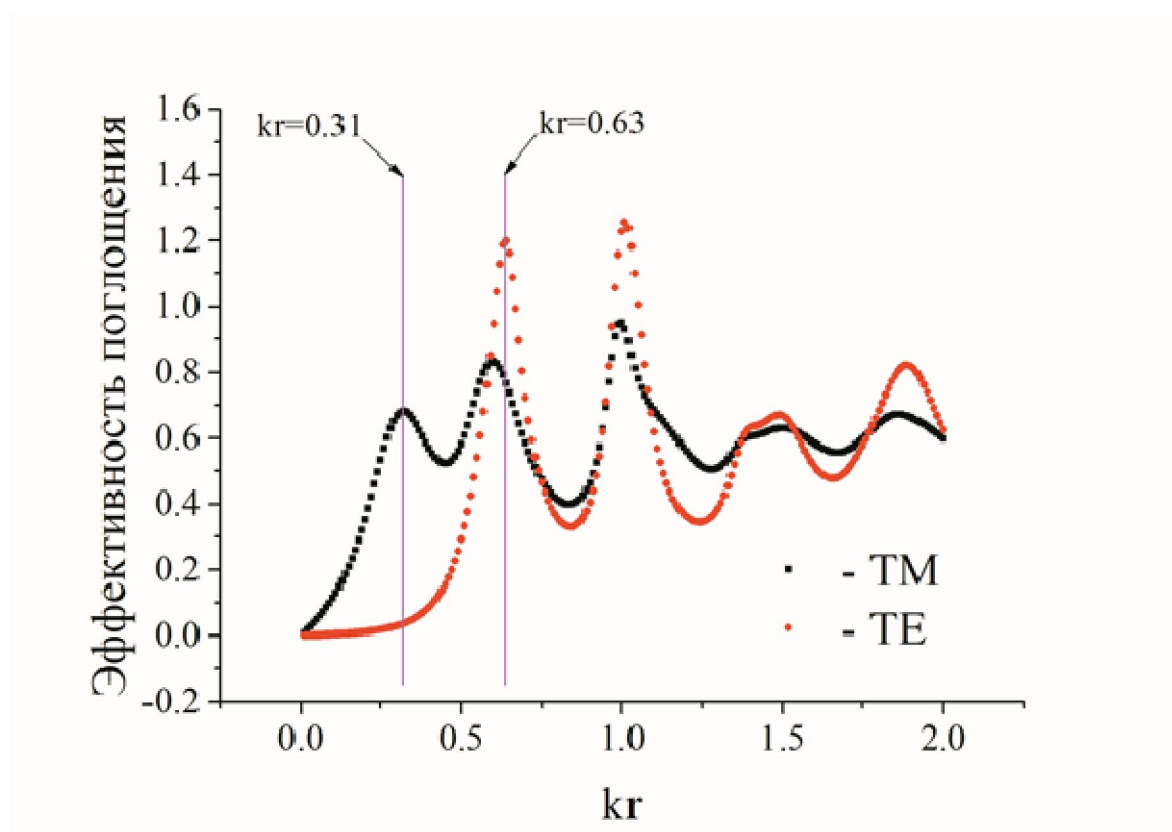


Рис.5. Спектры поглощения для ТМ –поляризации и ТЕ-поляризации

нанопровода будет уменьшаться. Следовательно, при этих условиях эффективность ТГц генерации будет спадать более интенсивно, чем при учете только выхода излучения точечного диполя из слоя с ННК. Поэтому максимальная эффективность генерации ТГц излучения массивом ННК будет, по-видимому, при условии $a \sim \lambda$ и возникновении в них резонансных возбуждений цилиндрических мод.

2. Продолжены исследования временной динамики изменения эффективности генерации ТГц излучения при возбуждении ННК оптическими фемтосекундными импульсами, как путем регистрации энергии ТГц импульса, так и волновых форм ТГц волны.

Исследование временной динамики фотовозбужденных носителей заряда в ННК на основе AlGaAs. В качестве источника оптического излучения использовался фемтосекундный Ti:S лазер, генерирующий световые импульсы длительностью 90 фс с частотой повторения 80 МГц. Центральная длина волны светового импульса составляла 795 нм. Длина волны светового импульса перестраивалась от 720 до 890 нм.

В ходе проекта исследовались образцы с нанопроводами на основе $Al_{0.2}Ga_{0.8}As$. Нанопровода выращивались на подложках GaAs (111)В в EP1203 MBE системе. Диаметр полупроводниковых нанопроводов составлял около 60 нм и длина порядка 1 мкм. Фактор заполнения поверхности нанопроводами составлял порядка 1.5%. Как оказалось, согласно нашим экспериментальным данным проводимость в этих проводах была n-типа. Были исследованы спектральные зависимости интенсивности ТГц излучения (зависимость от энергии кванта возбуждающего света) как для ННК на основе AlGaAs, так и для ННК на основе GaAs в зеркальной геометрии (рис.6). Данный эксперимент проводился при

фиксированном угле $\theta = 45^\circ$. Отметим, что зависимости имеют значительные отличия. При энергиях фотона накачки ниже 1.57 эВ - мощность ТГц излучения остаётся на уровне шума, но при увеличении энергии квантов света мощность генерации вырастает в более чем 5 раз по сравнению с уровнем шума. На рис.6 приведены энергетические уровни, соответствующие межзонным переходам в GaAs (1.42 эВ) и $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (1.67 эВ), а также уровень E_2 (1.57 эВ). В ряде работ экспериментально подтверждено, что тип кристаллической решётки AlGaAs нанопроводов меняется

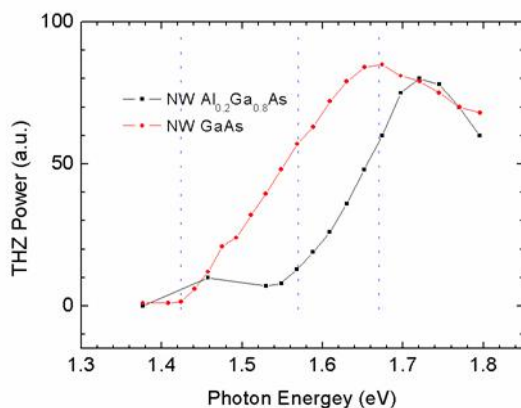


Рис.6. Зависимость средней мощности ТГц излучения от энергии кванта света оптической накачки. Штриховые линии соответствуют энергии запрещённой зоны для объёмного GaAs ($E_g = 1.424$ эВ), энергии запрещённой зоны объёмного $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ ($E_g = 1.67$ эВ) и начало генерации ТГц излучения от структуры, уровень E_2 ($E_2 \approx 1.57$ эВ).

с кубической на гексагональную с уменьшением радиуса нанопроводов. Также недавние исследования [5] фотолюминесценции тонких (диаметр 60 нм) нанопроводов из $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ показывают, что пик люминесценции примерно на 100 мэВ ниже, чем для объёмного кристалла $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ (у которого кристаллическая структура цинковой обманки). Это объясняется тем, что нанопровода из $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ такого диаметра представляют из себя смесь фаз кубической и гексагональной кристаллической решётки, и именно поэтому пик фотолюминесценции сдвигается. Наш образец имеет нанопровода такого же диаметра, но со стехиометрическим коэффициентом $x = 0.2$, который ниже, чем в представленной выше работе ($x = 0.3$). Однако, мы считаем, что с достаточной точностью уменьшение эффективной ширины запрещенной зоны кристалла, состоящий из нанокристаллов с кубической и гексагональной решёткой, должен совпадать с нашим случаем, то есть равняться 100 мэВ. Как результат, генерация ТГц в наноструктуре с ННК начинается с меньших энергий, что и наблюдается на рис.6 (уровень E_2). Важно отметить, что сдвиг по энергии относительно энергии запрещённой зоны в $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ составляет примерно 100 мэВ, что согласуется с работой по исследованию люминесценции [513]. Немного об так называемом смачивающем слое. Очевидно, что в данном случае он не определяет картину процесса генерации ТГц излучения в ННК на основе AlGaAs. В противном случае, ТГц генерация начиналась бы с уровней возбуждения порядка 1.67 эВ.

Динамика неравновесных носителей заряда была исследована с помощью метода optical-pump terahertz generation-probe time-domain spectroscopy. На рис.7 представлены временные зависимости энергии ТГц излучения для различных уровней возбуждения. Виден рост эффективности генерации ТГц излучения на временном интервале порядка 20 пс. Насыщение роста наблюдается при интенсивности возбуждения порядка 200 мВт. Как уже отмечалось (см. предыдущий отчет), рост эффективности генерации ТГц излучения

происходить за счет захвата носителей заряда на безызлучательные центры. При их заполнении подвижность носителей заряда увеличивается и по соответствующей зависимости можно оценить время захвата на безызлучательный центр, а по уровню интенсивности возбуждения при которой происходит насыщение роста - концентрацию безызлучательных центров. Время захвата составляет величину порядка 20 пс, а концентрация безызлучательных центров - порядка 10^{-17} . Длинные временные зависимости (от 5 пс до 1700 пс) энергии ТГц излучения для различных уровней возбуждения приведены на рис.8.

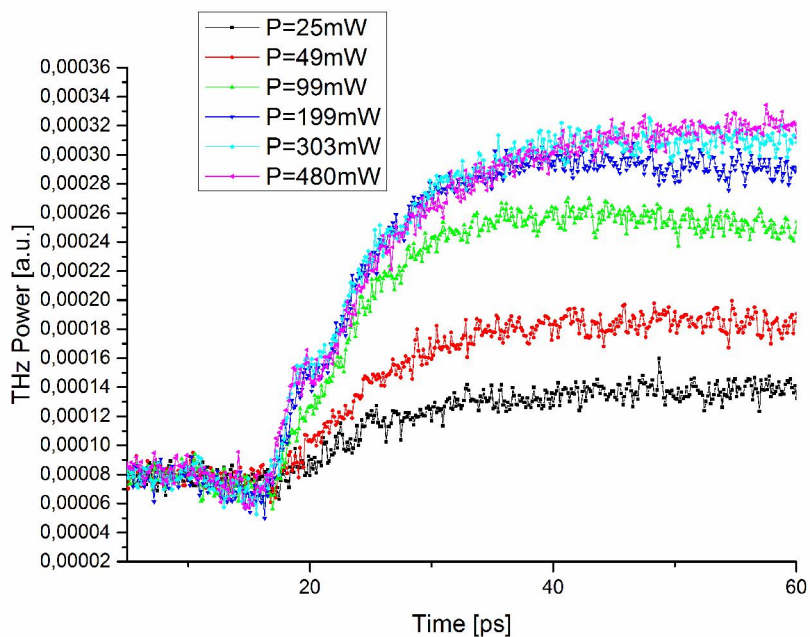


Рис.7. Временная зависимость средней мощности ТГц излучения при различных уровнях возбуждения.

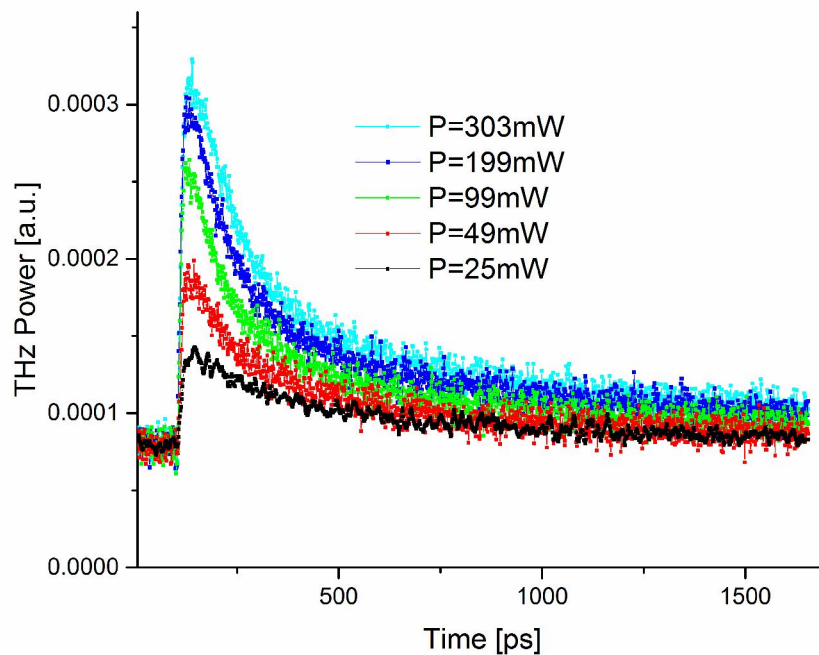


Рис.8. Временная зависимость (от 5пс до 1700пс) средней мощности ТГц излучения при различных уровнях возбуждения.

Восстановление прежнего значения эффективности генерации ТГц излучения состоит из одного или двух экспоненциальных этапов. Причем первый этап формируется при большом уровне возбуждения и скорость возврата к прежнему значению эффективности ТГц генерации возрастает с ростом уровня возбуждения. На втором этапе скорость заметно уменьшается и он, по-видимому, определяется временем жизни фотовозбужденных носителей заряда. Для уровня возбуждения $P=99$ мВт были оценены времена затухания (средняя плотность интенсивности возбуждающего импульса ~ 8.8 Вт/см², длина волны 730 нм), они составляют 130 и 1350 пс. Восстановление прежнего значения эффективности генерации ТГц излучения, связано с безизлучательной рекомбинацией через центры захвата и межзонной излучательной рекомбинацией. Наличие быстрого и медленного этапов восстановления эффективности генерации ТГц возможно обусловлено как наличием безизлучательных центров с различными сечениями захвата и концентрацией, так и проявлением двух экспоненциального характера рекомбинаций носителей заряда через безизлучательные центры.

3. Исследование временной динамики фотовозбужденных носителей заряда в упорядоченных массивах ННК на основе GaAs. В качестве источника оптического излучения использовался фемтосекундный Ti:S лазер, генерирующий световые импульсы длительностью 15 фс с частотой повторения 80 МГц. Центральная длина волны светового импульса составляла 795 нм.

В ходе выполнения проекта проводилась регистрация волновой формы терагерцового импульса при дополнительном возбуждении ННК фемтосекундным импульсом с помощью метода optical-pump terahertz generation-probe time-domain spectroscopy. Для

уменьшения влияния модуляции ТГц импульса, генерируемого дополнительным фемтосекундным импульсом (импульс накачки), на частоте модуляции первого (пробного импульса) фемтосекундного импульса, импульс накачки попадал на поверхность образца под углом $-\theta$ (противоположный угол углу падения пробного импульса). Тем не менее это влияние наблюдалось. На рис.9 представлена временная зависимость максимальной амплитуды ТГц поля для разного уровня возбуждения.

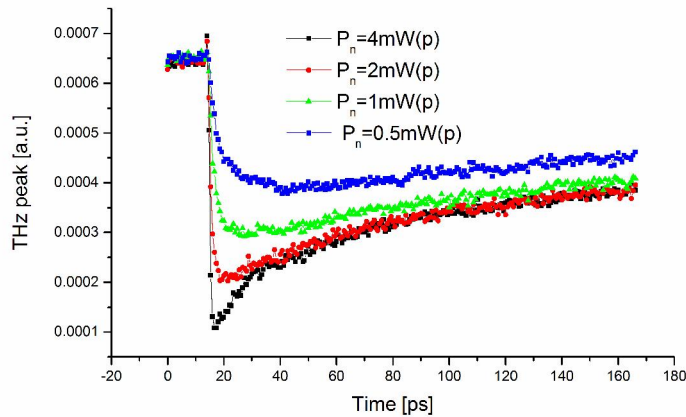


Рис.9. Зависимость максимальной амплитуды ТГц поля от времени задержки между фемтосекундными импульсами для различного уровня возбуждения ($d=150\text{nm}$, $a=1500\text{nm}$).

На представленных зависимостях после возбуждения электронно-дырочной плазмы ТГц поле генерируемого импульса падает, а затем медленно восстанавливается. Падение эффективности ТГц генерации, в основном, обусловлено со временем экранирования внутреннего поля в нанокристалле (поверхностное поле возле верхней грани нанокристалла). И здесь также наблюдается двухэкспоненциальное восстановление при высоком уровне возбуждения. Первый этап восстановления эффективности ТГц генерации обусловлен рядом процессов: захват носителей заряда, перезарядка емкости барьера Шотки. Временная составляющая второго подъема, по-видимому, определяется временем жизни фотовозбужденных носителей заряда и обусловлена рекомбинацией. Увеличенная часть кривых около момента совпадения импульса накачки и пробного импульса представлена на рис.10 (оси - в логарифмическом масштабе).

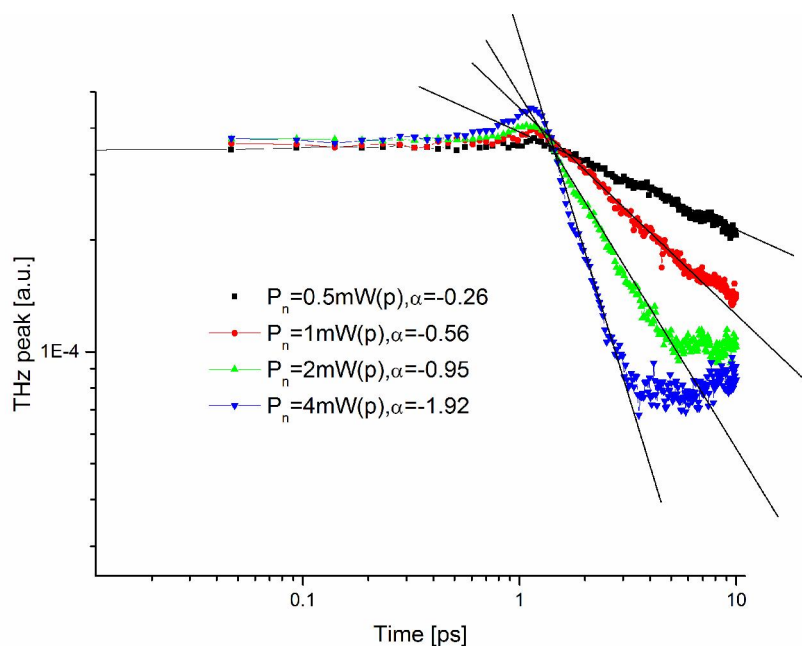


Рис.10. Зависимость максимальной амплитуды ТГц поля от времени задержки между фемтосекундными импульсами для различного уровня возбуждения ($d=150\text{nm}$, $a=1500\text{nm}$).

Начальный небольшой рост эффективности ТГц генерации обусловлен влиянием модуляции ТГц импульса, генерируемого импульсом накачки. Также видно, что спад ТГц поля происходит по степенному закону и степень определяется уровнем возбуждения. Причина такого поведения пока не совсем понятна. Для уточнения природы процесса, приводящего к такой временной динамике, необходимо проведение дальнейших экспериментов.

Литература

- [1] *Wait J. R.* // *Can. J. Phys.* 1955. V. 33. P. 189.
- [2] *Chew H., Cooke D. D., Kerker M.* // *Applied Optics.* 1980. V. 19. P. 44.
- [3] *Hu S., Chi C-Y., Fountaine K.T., Yao M. et al.* // *Energy Environ. Sci.* 2013. V. 6. P. 1879.
- [4] *Trukhin V. N., Andrianov A. V., Zinov`ev A. V.* // *Phys. Rev. B.* 2008. V. 78. P. 155325.
- [5] *V. N. Kats, V.P. Kochereshko, A.V. Platonov et al., Semiconductor Science and Technology* **27**, 015009 (2011).

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем

Результаты, полученные на данном этапе выполнения проекта, являются достижениями мирового уровня. По результатам выполненных исследований опубликованы статьи в ведущих научных изданиях, таких как *Applied Physics Letters*, *Письма в ЖЭТФ*, и готовится ряд публикаций. Исследования в области направления, охваченного в настоящем проекте, относятся к одной из самых современных областей физики – терагерцовой когерентной спектроскопии и нанотехнологии. Работы по данной тематике ведутся в основных мировых исследовательских центрах. В настоящее время по данной

тематике в мире проводится в год не менее 5 международных конференций, что также свидетельствует о важности данного направления.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

Синтез полупроводниковых нитевидных нанокристаллов (ННК) осуществлялся методом селективного роста. Это позволило создать образцы упорядоченных массивов ННК, имеющих определенные значения диаметра нанокристалла и периода между ННК. При исследовании процессов генерации терагерцового излучения в ННК использовались методы когерентной терагерцовой спектроскопии. Новизна предлагаемых решений обуславливается использованием методов когерентной нелинейной оптики как для преобразования излучения видимого или ИК-излучения в ТГц диапазон, так и для регистрации ТГц излучения.

Характеризация динамики носителей заряда в полупроводниковых наноструктурах имеет решающее значение для использования этих материалов в электронных и оптоэлектронных приборах. Созданная в ходе выполнения проекта экспериментальная установка для проведения исследований с помощью метода optical-pump terahertz generation-probe time-domain spectroscopy, фактически, изучает влияния электронно-дырочной плазмы, сгенерированной оптическим импульсом, на эффективность генерации ТГц излучения, обусловленную фотоносителями. Соответственно, если неравновесные носители, возбужденные оптическим импульсом, будут захватываться на глубокие центры, эффективность генерации ТГц излучения будет отслеживать изменение времени релаксации носителей заряда по импульсу. Если генерация ТГц излучения будет определяться движением носителей заряда в контактном поле, временной генезис разделения электронов и дырок будет также сказываться на генерацию ТГц излучения.

Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2015 году (указать работу, выполненную каждым членом коллектива по Проекту в 2015 году с новой строки)

Буравлев Алексей Дмитриевич-синтез ННК, подготовка публикаций

Лукашенко Станислав Юрьевич-оптические эксперименты

Мустафин Илья Андреевич-оптические эксперименты, участие в конференции, подготовка статей

Мухин Иван Сергеевич- подготовка образцов, оптические эксперименты

Трухин Александр Валерьевич - программное обеспечение автоматизированной установки, оптические эксперименты

Трухин Валерий Николаевич -оптические эксперименты, теоретическое моделирование, подготовка публикаций, общее руководство

Цырлин Георгий Эрнстович- синтез ННК, подготовка публикаций

Штром Игорь Викторович-синтез ННК, подготовка образцов

Количество научных работ по Проекту, опубликованных в 2015 году

5

Из них в изданиях, включенных в перечень ВАК

2

Из них в изданиях, включенных в библиографическую базу данных РИНЦ

2

Из них в изданиях, включенных в международные системы цитирования (библиографические и реферативные базы научных публикаций)

2

Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения Проекта и принятых к печати в 2015 году (цифрами)

10

Участие в 2015 году в научных мероприятиях по тематике Проекта (указать названия мероприятий и тип доклада)

1. XIX Международный симпозиум «Нанозифика и нанозлектроника», г.Нижний Новгород, 10.03 -14.03, 2015, устный доклад.
2. XII Российской конференции по физике полупроводников, г.Звенигород, 21.09-25.09, 2015, устный доклад.
3. Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотозлектроники «Фотоника-2015»,г.Новосибирск, 12.10-16.10, 2015, устный доклад.
6. German THz conference 2015, г.Дрезден, Германия, 08.06-10.06, 2015, постер.

Участие в 2015 году в экспедициях по тематике Проекта, которые проводились при финансовой поддержке Фонда (указать номера проектов)

Нет

Финансовые средства, полученные в 2015 году от Фонда (указать общий объем, в руб.)

520000

Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных авторами по данному проекту, например, <http://www.somewhere.ru/mypub.html>

Нет

Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных в 2015 году, в порядке значимости: монографии, статьи в научных изданиях, тезисы докладов и материалы съездов, конференций и т.д.

1. Trukhin V.N., Bouravleuv A.D., Mustafin I.A., Kakko J.P., Huhtio T., Cirlin G.E., Lipsanen H., Generation of terahertz radiation in ordered arrays of GaAs nanowires, Appl. Phys. Lett., v.106, 25 , p. 252104(2015).
- 2V. N. Trukhin, A. S. Buyskih, A. D. Bouravlev, I. A. Mustafin, Yu. B. Samsonenko, A. V. Trukhin, G. E. Cirlin, M. A. Kaliteevski, D. A. Zeze, A.J.Gallant, Generation of THz radiation by AlGaAs nanowires, Письма ЖЭТФ, т.102, 5, 348-353(2015).

3. В.Н.Трухин, А.Д. Буравлев, И.А. Мустафин, J.P. Kakko, T. Huhtio, H. Lipsanen, Генерация терагерцового излучения в периодическом ансамбле полупроводниковых нитевидных нанокристаллах на основе GaAs, Труды XIX Международного симпозиума «Нанопизика и нанопэлектроника», г.Нижний Новгород, 10.03 -14.03, т.2, с.675-677 (2015).

4. А.Д.Буравлев, И.А. Мустафин, В.Н. Трухин, J.P. Kakko, T. Huhtio, H. Lipsanen, Влияние резонансного поглощения Ми на эффективность генерации терагерцового излучения в полупроводниковых нитевидных нанокристаллах, Труды XII Российской конференции по физике полупроводников, г.Звенигород, 21.09-25.09, с.124 (2015).

5. А.Д.Буравлев, И.А. Мустафин, В.Н. Трухин, Г.Э. Цырлин, J.P. Kakko, T. Huhtio, H. Lipsanen, Эффективная генерация терагерцового излучения в периодическом массиве полупроводниковых нитевидных нанокристаллах на основе GaAs, Тезисы докладов российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2015»,г.Новосибирск, 12.10-16.10, с.31 (2015).

Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Индустрия наносистем

Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Технологии наноустройств и микросистемной техники

Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта

Не очевидно