

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

P9-88-542

В.К.Горчаков\*, В.М.Жабицкий, А.М.Каминская,  
В.В.Куцаенко\*, В.К.Маковеев, В.А.Мельников,  
В.Т.Потапов\*, А.А.Фатеев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПОККЕЛЬСА  
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ  
В ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

\*Институт радиотехники и электроники АН СССР,  
Москва



## 1. ВВЕДЕНИЕ

В ускорительной технике весьма важным является измерение параметров ускоряющего электрического поля - одного из основных факторов, воздействующих на пучок.

В настоящее время при измерении ускоряющих полей обычно получают интегральные параметры /полное напряжение, подаваемое на секцию ускорителя, форма импульса напряжения и т.п./. Эти параметры, как правило, определяются с помощью низкоиндуктивных высокоомных делителей напряжения, включенных параллельно секции, или путем измерения тока, наводимого полем в эквивалентной нагрузке. Такие измерения сопряжены с необходимостью защиты регистрирующей аппаратуры и сигнальных линий от воздействия высоковольтных и импульсных помех.

Вместе с тем в последнее время развивается принципиально иной метод измерения электрических полей, основанный на использовании линейного электрооптического эффекта /эффект Поккельса/. Например, в работе<sup>/1/</sup> описывается датчик, позволяющий измерять параметры переменных электрических полей напряженностью до 400 кВ/м с порогом чувствительности 1 кВ/м в полосе до 50 кГц. Работа<sup>/2/</sup> посвящена использованию эффекта Поккельса для абсолютных измерений импульсной СВЧ-мощности в волноводе на длинах волн 3,2 см. Известны работы, где в двойных формирующих линиях измеряется произведение напряженности поля на длину с применением эффекта Керра<sup>/3/</sup>. Необходимо отметить, что эффект Керра квадратичен по полю, и поэтому его использование менее удобно, чем эффекта Поккельса.

Цель настоящей работы состояла в анализе и экспериментальной проверке пригодности эффекта Поккельса для измерения локальных и интегральных параметров ускоряющих полей в линейных индукционных ускорителях, где характерные напряженности поля превышают 100 кВ/м, а длительности импульсов напряжений составляют десятки наносекунд.

## 2. ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА И ЕГО ПРИМЕНИМОСТЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Линейный электрооптический эффект состоит в изменении под действием внешнего электрического поля /и пропорционально ему/ элементов тензора диэлектрической проницаемости кристаллов,

симметрия которых не имеет центра инверсии /пьезоэлектрики/. Возникающую анизотропию можно рассматривать как индуцированное двулучепреломление. Подробное математическое описание этого эффекта можно найти в [4-6], там же можно найти обзор свойств электрооптических кристаллов.

Для получения и наблюдения эффекта существенна взаимная ориентация кристаллографических осей, приложенного поля, направления распространения и поляризации света. Кроме того, свое влияние могут оказывать такие свойства конкретных кристаллов, как естественное двулучепреломление, оптическая активность, эффект электрогирации и другие. Учет всех этих особенностей должен проводиться в конкретных схемах. Для иллюстрации физической сущности эффекта примем к рассмотрению какой-либо кристалл, не имеющий указанной выше специфики. Такому требованию в наибольшей степени соответствует кубическая система симметрии.

Пусть внешнее поле приложено вдоль кристаллографической оси (001). Как уже отмечалось выше, это должно приводить к возникновению анизотропии. Ее можно, в частности, охарактеризовать изменением показателей преломления вдоль наведенных оптических осей [5]:

ось (001) -  $n_z \approx n_0$  /без изменения/

ось (110) -  $n_{x'} \approx n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r E_i$  /1/

ось ( $\bar{1}10$ ) -  $n_{y'} \approx n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r E_i$ .

В выражениях /1/  $n_0$  - показатель преломления кристалла в отсутствие поля,  $r$  - электрооптический коэффициент,  $E_i$  - поле внутри кристалла.

Пусть вдоль оси (001) распространяется луч света /продольный эффект/. Тогда его компоненты, поляризованные вдоль осей (110) и ( $\bar{1}10$ ), будут иметь фазовые скорости соответственно

$$v_{x'} = \frac{c}{n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 r E_i}, \quad /2/$$

$$v_{y'} = \frac{c}{n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 r E_i}.$$

При прохождении света сквозь кристалл разность фазовых скоростей /2/ приводит к сдвигу фаз соответствующих компонент, который в линейном приближении есть:

$$\Gamma = 2 \frac{\pi}{\lambda} (v_{x'} - v_{y'}) l = 2 \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 r E_i l, \quad /3/$$

здесь  $\lambda$  - длина волны света в вакууме;  $\ell$  - оптический путь света в кристалле.

Сдвиг фаз  $\Gamma$  линейно зависит от  $E_i$ , то есть /3/ описывает фазовую модуляцию света в кристалле внешним полем. На выходе из кристалла эти ортогональные, сдвинутые по фазе компоненты интерферируют и дают, в общем случае, эллиптически поляризованный свет /поляризационная модуляция/. На практике наиболее удобно работать с амплитудной модуляцией, которую легко получить из поляризационной с помощью анализатора. Если его расположить так, чтобы в отсутствие поля свет сквозь систему не проходил, то выражение для амплитудной модуляции будет иметь вид

$$I = I_0 \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} \Gamma n_0^3 E_i \ell\right). \quad /4/$$

По существу, выражение /4/ представляет собой функцию отклика измерительной системы. Она имеет периодический характер, причем областью однозначности является диапазон изменения  $\Gamma$  от 0 до  $\pi$  /или любой кратный ему/. Производная /4/ по  $\Gamma$  определяет чувствительность системы. Легко убедиться в том, что она имеет максимум в точке  $\Gamma = \pi/2$ . Кроме того, в окрестности этой точки максимально широка область линейной аппроксимации /4/ с некоторой, заранее заданной точностью. Эта аппроксимация имеет вид

$$\frac{I}{I_0} = 0,5 + \frac{1}{2} \Delta\Gamma = 0,5 + \alpha E_0, \quad /5/$$

где  $\Delta\Gamma = \Gamma - \frac{\pi}{2}$ ,  $\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \Gamma n_0^3 E_i \ell$ . При изменении  $\Delta\Gamma$  на  $\pm\pi/8$  формула /5/ дает погрешность около 5% по сравнению с /4/.

Таким образом, регистрируя изменение интенсивности проходящего через описанную систему света, можно производить адекватные измерения напряженности поля, в котором находится кристалл.

Для поставленной задачи существенными являются частотные возможности метода. Их можно определить, руководствуясь следующими соображениями. Природа эффекта лежит на молекулярно-атомном уровне, что дает ограничение  $\approx 10^{12}$  Гц. С другой стороны, длина волны измеряемого поля должна быть много больше длины чувствительного элемента /кристалла/, т.е. при  $\ell \approx 1$  см имеем ограничение  $\approx 1$  ГГц. Отсюда ясно, что высокочастотные ограничения скорее будут обусловлены фоторегистрирующей аппаратурой. Со стороны низких частот ограничения определяются конечной удельной проводимостью кристаллов и соответствующим временем перераспределения зарядов. В ряде ситуаций могут проявляться пьезоэффекты, носящие характер довольно узких резонансов в мегагерцевой области частот.

### 3. ОПИСАНИЕ ДАТЧИКА

При разработке датчиков одним из ключевых моментов является выбор кристалла. Исходя из требований предполагаемого эксперимента находится компромисс по электрооптическим, оптическим, механическим, химическим и другим свойствам кристалла, температурной стабильности оптических параметров, а также по его доступности. В настоящей работе предпочтение отдано кристаллу силикосилленита  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ .

Кристалл силикосилленита относится к группе 23 кубической симметрии. В отсутствие поля он изотропен, показатель преломления  $n_0 = 2,49$  для длины волны света  $\lambda = 0,85$  мкм, электрооптический коэффициент  $r \approx 3,70 \cdot 10^{-12}$  м/В /для высоких частот/. Кристалл оптически активен ( $\theta = 21,8^\circ/\text{мм}$ ), обладает эффектом электрогирации, который не проявляется при ориентации внешнего поля вдоль оси (001).

Оптимальной формой кристалла можно считать такую, при которой поле в кристалле  $E_i$  меньше всего отличается от внешнего поля  $E_0$  как по геометрии, так и по амплитуде. Известно<sup>77</sup>, что такому требованию отвечают эллипсоиды, вытянутые вдоль поля, или приближающиеся к ним формы. В этом случае связь величин внешнего и внутреннего поля имеет вид

$$E_i = E_0[(\epsilon - 1)N_i(a, b, c) + 1]^{-1}. \quad /6/$$

Здесь  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость кристалла;  $a, b, c$  - полуоси эллипсоида,  $N_i$  - фактор деполяризации, асимптотически убывающий до нуля при  $a \gg b, c$ .

В описываемом датчике кристалл вырезан вдоль оси (001) в виде цилиндра  $\varnothing 1,5 \times 8$  мм. При этом  $E_i \approx 0,38 E_0$ . Выбор длины кристалла обуславливался требованием по чувствительности и учетом оптической активности.

Схема датчика приведена на рис.1.

Датчик действует следующим образом. Источник света /суперлюминесцентный диод/ выдает световой импульс, который передается по волоконно-оптической линии связи /ВОЛС/ типа "Градиан".

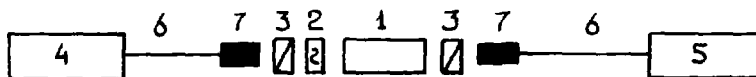


Рис.1. Схема датчика на кристалле силикосилленита.  
1 - кристалл, 2 - фазовая пластинка, 3 - поляризатор,  
4 - источник света, 5 - фотоприемник, 6 - волоконно-оптические линии связи, 7 - градиентные линзы.

Градиентная линза превращает выходящий из световода / $\phi$  50 мкм/ сильно расходящийся луч света в луч  $\phi$  1,5 мм со слабой расходимостью. После прохождения поляризатора и четвертьволновой пластинки свет имеет круговую поляризацию /тем самым осуществляется вывод датчика в рабочую линейную область, о которой говорилось выше/. На выходе из кристалла в присутствии внешнего поля свет становится эллиптически поляризованным. Еще один поляризатор преобразует поляризационную модуляцию в амплитудную. Регистрируется световой сигнал фотоприемником, построенным на основе р-і-п-диода.

Расчетная функция отклика имела вид

$$S^{th} = 1 - 8,16 \cdot 10^{-4} E_0, \quad /7/$$

где  $E_0$  - измеряемое поле в кВ/м.

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальная проверка применимости описанного датчика к измерению импульсных ускоряющих электрических полей была проведена на стенде модели ускоряющей секции СИЛУНД/8/. Среднее значение напряженности поля около 200 кВ/м, длительность импульса на полувысоте  $\approx 50$  нс.

Измерения напряжений на выходе усилителя сигнала с фотоприемника проводились с помощью преобразователей В9-5 и аппаратуры в стандарте КАМАК на линии связи с ПЭВМ "Правец-16". Временная диаграмма работы электронной аппаратуры и импульсов излучения приведена на рис.2.

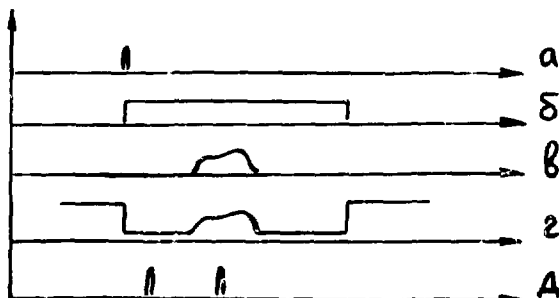


Рис.2. Временные диаграммы измерений: а - стартовый импульс системы синхронизации; б - импульс излучения; в - импульс напряжения на секции; г - выходной сигнал датчика; д - стробирующие импульсы /4 нс/ для измерения  $U_1$  и  $U_2$ .

Значение напряжения выходного сигнала бралось в двух временных точках:  $U_1$  - вне поля и  $U_2$  - вблизи максимума поля. Калибровка датчика на воздушном конденсаторе, запитываемом от одного из каскадов схемы формирования импульса напряжения, дала следующий результат /обработка по методу наименьших квадратов, см. также рис.3/:

$$S^{ex} = (0,764 \pm 0,014) - (8,3 \pm 1,2) \cdot 10^{-4} E. \quad /8/$$

Как видно, коэффициент при  $E$  хорошо согласуется с расчетным значением. Отличие свободного коэффициента от единицы связано, скорее всего, с разбалансировкой одного из АЦП, либо за счет искажений отображения оптического импульса регистрирующим прибором.

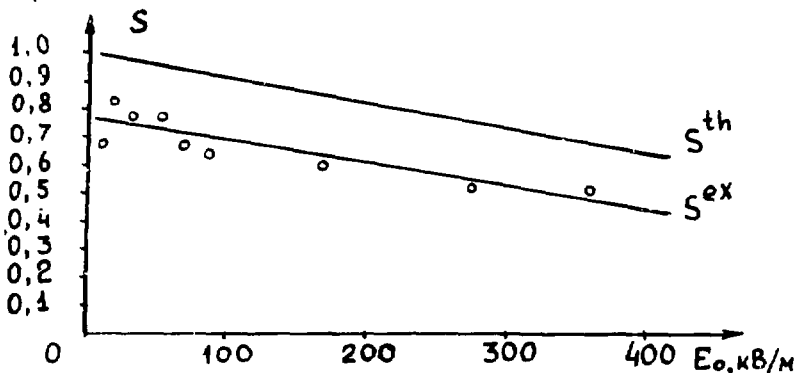


Рис.3. Калибровка датчика.

На рис.4 приведена осциллограмма сигнала с датчика /верхний луч/ и сигнала с высокоомного делителя /нижний луч/, снятая при калибровке на воздушном конденсаторе. Сравнение характеризует высокочастотные возможности датчика и его независимость от источников высоковольтных и импульсных помех /никакие меры защиты датчика от них не предпринимались/. Отсутствие искажений структуры импульса может служить основанием



Рис.4. Осциллограммы выходных сигналов датчика и высокоомного делителя.



для утверждения о том, что временное разрешение датчика не хуже 10 нс.

Способность датчика измерять локальные параметры поля демонстрируется измерением распределения ускоряющего поля вдоль оси модели секции. На рис.5 показана зависимость амплитуды сигнала от координаты при перемещении датчика по оси /кривая 1, шаг 5 см/ и максимально близко к внутренней стенке ускорительной камеры /кривая 2, шаг 1 см/. Вертикальные штриховые линии показывают расчетные /по конструкции секции/ положения максимумов поля. Отклонения не превышают длины чувствительного элемента. Тем самым подтверждается адекватность измерений и достигнутое пространственное разрешение не хуже 1 см.

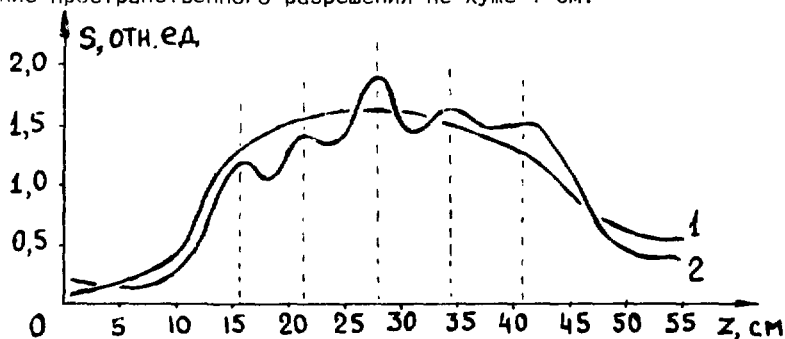


Рис.5. Распределение поля вдоль оси секции в центре /1/ и на периферии /2/.

Статистический разброс измеренных данных в каждой точке составлял около 5%, суммарная погрешность оценивалась в 10-15%. Основной причиной погрешности, по-видимому, является нестабильность синхронизации, обусловленная нелинейностью схем сжатия импульса в системе питания стэнда.

## 5. ВЫВОДЫ

Приведенный краткий анализ и результаты эксперимента позволяют утверждать, что электрооптические датчики на основе эффекта Погкельса пригодны для измерения ускоряющих электрических полей. Достоинства метода — локальность измерений, хорошая помехозащищенность сигнальных линий, достаточная широкополосность — свидетельствуют о его перспективности.

Быстрое развитие схем датчиков и освоение новых кристаллов приведут к расширению области их применения в ускорительной диагностике.

В заключение авторы выражают признательность Г.В.Долбилову и И.Н.Иванову за постоянный интерес к работе и поддержку.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куцаенко В.В. и др. - ЖТФ, 1985, т.55, вып.7, с.1370.
2. Аракелов А.Г. и др. - ЖТФ, 1985, т.55, вып.10, с.2031.
3. Kuhler A. et al. In.: 5 IEEE Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, 1985, p.385.
4. Ярив А. Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
5. Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
6. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
8. Долбилов Г.В. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-86-290, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июля 1988 года.

Использование эффекта Погкельса для измерения ускоряющего поля в линейных индукционных ускорителях

Для измерения локальных и интегральных параметров ускоряющих полей в линейных индукционных ускорителях предлагается датчик на основе электрооптического эффекта Погкельса в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ . Эффект можно рассматривать как индуцированное электрическим полем линейное двулучепреломление. Изменение состояния поляризации света преобразуется в амплитудную модуляцию интенсивности. Импульсы светового излучения передаются по многомодовому волоконному световоду. Пространственное разрешение определяется чувствительным элементом /не хуже 1 см/. Временное разрешение ограничено быстродействием фотодетектора /не хуже 10 нс/. Созданный датчик позволяет измерять поля напряженностью от 30 до 1500 кВ/м. Он обеспечивает гальваническую развязку от высоковольтных источников и помехозащищенность линии передачи информации. С помощью этого датчика проведены автоматизированные измерения распределения электрического поля в модуле секции ЛИУ.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Gorchakov V.K. et al.

P9-88-542

The Use of Pockels Effect for Measurement of Accelerating Field in Linear Induction Accelerators

The Pockels type sensor is proposed for measuring local and integral parameters of accelerating fields in linear induction accelerators. The sensor is based on electrooptical Pockels effect in  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  crystal. The effect could be considered as two-ray refraction induced by electric field. The change of light polarization state is transformed into amplitude modulation of intensity. The light radiation pulses go via multimode filament light guide. Space resolution is limited by sensor (not worse than 1 cm). Time resolution is limited by speed of response of photodetector (not worse than 10 ns). The sensor allows one to measure electric field strength in the 30 upto 1500 kV/m voltage region. It provides isolation of high-voltage sources and has a good noise immunity of data transmission line. Automatic measurements of electric field distribution in a module of LIA section were performed by means of this sensor.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1988

13 коп.

Редактор Е.К.Аксенова. Макет Н.А.Киселевой.  
Чабор Л.В.Пахомовой.

Подписано в печать 02.09.88.

Формат 60х90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,83.

Тираж 320. Заказ 40966.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.