

УДК 537.226.4;537.533.2

ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СПОНТАННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МОНОДОМЕННОМ КРИСТАЛЛЕ $LiNbO_3$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Ю. В. Коробкин, И. В. Романов, А. А. Рупасов, А. С. Шиканов,
А. Мурти¹, С. Сайладжа¹, П. А. Найк¹, П. Д. Гупта¹

Представлены результаты экспериментов по эмиссии электронных пучков поверхностью монокристалла $LiNbO_3$ при изменении спонтанной поляризации под воздействием лазерного излучения и импульсного электрического поля. В эксперименте получены пиковые плотности токов до 400 A/cm^2 с общим количеством электронов до 10^{15} электронов в импульсе.

Сегнетоэлектрические материалы представляют большой интерес с точки зрения потенциальных эмиттеров мощных электронных пучков, возникающих при реверсировании наведенной спонтанной поляризации под действием внешних воздействий [1 – 4]. Качественное объяснение механизма эмиссии заключается в том, что на поверхности поляризованной пластины сегнетоэлектрического образца появляются свободные заряды, компенсирующие электрическое поле связанных поверхностных зарядов (эффект экранирования), которые не удерживаются более полем сегнетоэлектрика и могут быть сняты [5]. Наиболее перспективными материалами являются кристаллы с наибольшей спонтанной поляризацией \vec{P}_S и наименьшей температурой Кюри. С этой точки зрения монокристаллы $LiNbO_3$ отличаются высокой величиной спонтанной поляризации $45 - 70 \text{ мкКл/см}^2$, однако имеют аномально высокую температуру Кюри ($1200 - 1300^\circ\text{C}$).

¹Центр передовых технологий, Индора, Индия.

С точки зрения эксперимента работа была разбита на два этапа: 1) исследование влияния прямоугольного импульса электрического поля на изменение вектора спонтанной поляризации, приводящее к эмиссии электронов; 2) испускание электронов при реверсировании спонтанной поляризации под действием лазерного излучения без приложения внешнего поля.

Время переключения вектора \vec{P}_S сильно зависит от температуры кристалла, напряженности приложенного постоянного электрического поля и ряда других факторов [6]. Существование слоев пространственного заряда на поверхности сегнетоэлектрика вызывает сильное электрическое поле, направление которого перпендикулярно поверхности. Если приложить к кристаллу электрическое поле в направлении, противоположном направлению его поляризации, то каждый существующий антипараллельный домен начинает немедленно расти посредством движения стенок домена вперед и в стороны [7]. Быстрое изменение \vec{P}_S , вызванное высоковольтными импульсами, скажется в появлении больших поверхностных зарядов, которые могут быть источником электронной эмиссии.

Следует ожидать, что наибольшие плотности поверхностного заряда будут достигнуты при комбинированном быстром изменении вектора \vec{P}_S и высвобождении пространственных зарядов при импульсном лазерном облучении. Такой фотоэлектрический эффект будет приводить к эмиссии электронов. Наряду с этим, необходимо учитывать и изменение спонтанной поляризации за счет лазерного нагрева (пироэффекта). Особый интерес представляет обращение вектора \vec{P}_S в таком направлении, чтобы электроны создавались на освещаемой поверхности. Для этого необходимы частично перфорированные электроды. Для получения быстрой переориентации вектора \vec{P}_S необходимо работать в области температур, очень близких к областям фазовых переходов [8].

Используемый в работе монокристалл $LiNbO_3$ с добавками Fe и Mg имел $\phi 14$ мм, толщину $d = 6$ мм. На рабочие поверхности кристалла были нанесены кольцевые индиевые электроды, так что эмиттирующая поверхность имела $\phi 10$ мм. Диэлектрическая проницаемость ϵ кристалла имела величину $2.65 \cdot 10^{-12}$ Ф/см, удельное сопротивление $\rho = 9.8 \cdot 10^{10}$ Ом · см, коэффициент поглощения α на длине волны второй гармоники неодимового лазера, без учета отражения на гранях, составлял 2.2 см $^{-1}$.

Измерения проводились в вакууме $\approx 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. Для реверсирования вектора \vec{P}_S использовался прямоугольный высоковольтный импульс, формируемый схемой для произвольной нагрузки без отражений, описанной в [9]. В качестве коммутатора использовался газонаполненный разрядник с лазерным поджигом. Сбор электронов производился с помощью коллектора с площадью поперечного сечения ≈ 3 см 2 и разделительной

емкостью 20 нФ , на который подавался положительный потенциал относительно эмиттирующей поверхности кристалла. Большинство измерений проводилось при потенциале коллектора 20 кВ и расстоянии коллектор-эмиттирующая поверхность $\approx 1 \text{ см}$, так что вытягивающее поле было порядка 20 кВ/см .

На первом этапе исследовалась эмиссия электронов при приложении на кристалл прямоугольного высоковольтного импульса. В эксперименте использовались как положительные, так и отрицательные импульсы, причем для положительных импульсов максимальная длительность составляла 150 нс , минимальная – 25 нс . Длительность отрицательного импульса по полувысоте была постоянной и равнялась 25 нс . Максимальная амплитуда импульса 20 кВ .

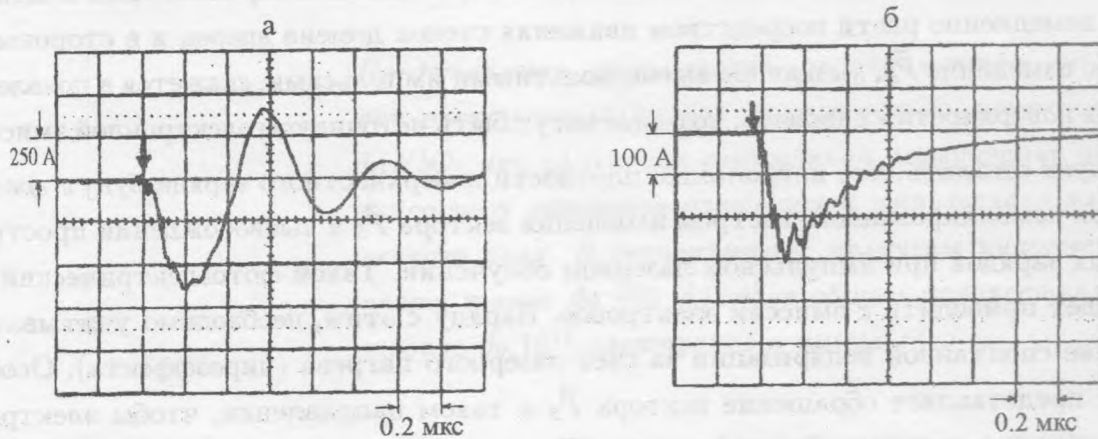


Рис. 1. Осциллограммы импульса эмиссионного тока при положении кристалла, когда вектор спонтанной поляризации направлен к коллектору: а) направление внешнего поля противоположно направлению вектора спонтанной поляризации кристалла; б) внешнее поле параллельно вектору спонтанной поляризации кристалла. Стрелкой указано время подачи импульса поля. Амплитуда высоковольтного импульса отрицательной полярности 20 кВ , длительность импульса 25 нс .

В экспериментах при воздействии на поляризацию высоковольтными импульсами электрическое поле прикладывалось как параллельно вектору поляризации, так и в противоположном направлении, причем кристалл располагался по отношению к коллектору таким образом, что вектор поляризации был направлен либо к коллектору (положение 1), либо в противоположном направлении (положение 2). При проведении данной работы было получено несколько интересных результатов. При приложении

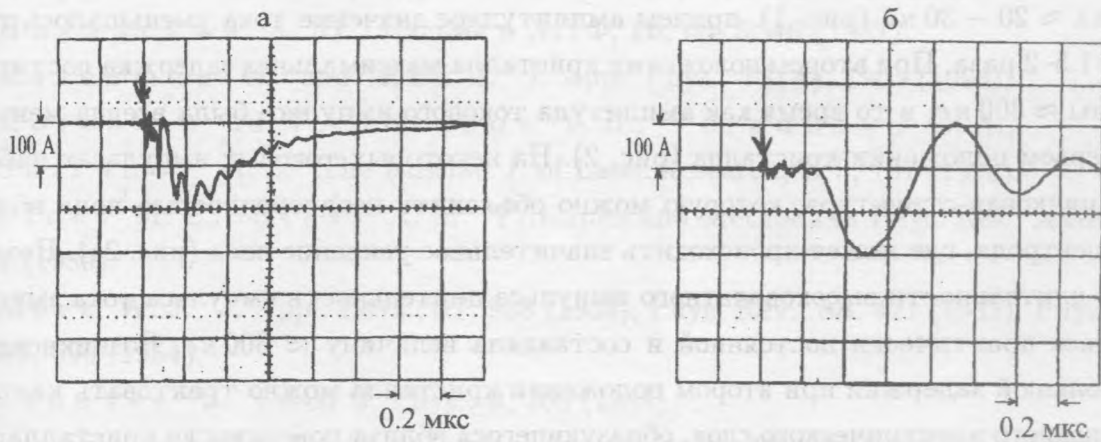


Рис. 2. Осциллограммы импульса эмиссионного тока при положении кристалла, когда вектор спонтанной поляризации направлен от коллектора: а) направление внешнего поля противоположно направлению вектора спонтанной поляризации кристалла; б) внешнее поле параллельно вектору спонтанной поляризации кристалла. Амплитуда высоковольтного импульса отрицательной полярности 20 кВ, длительность импульса 25 нс.

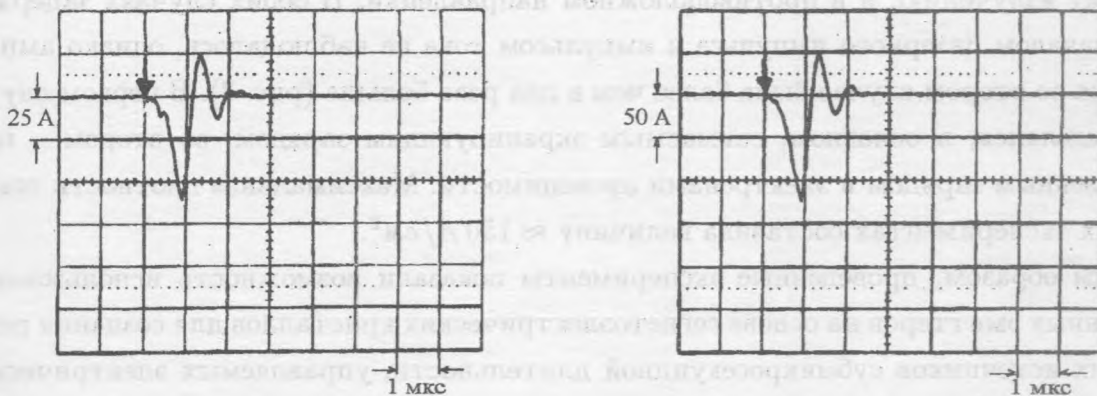


Рис. 3. Осциллограммы тока эмиссии при лазерном воздействии на кристалл: а) вектор спонтанной поляризации направлен навстречу лазерному лучу; б) вектор спонтанной поляризации совпадает по направлению с распространением лазерного луча. Стрелкой указано время воздействия лазерного импульса. Интенсивность лазерного излучения на поверхности кристалла $2.5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$.

поля в направлении, противоположном направлению \vec{P}_S (кристалл в положении 1), электронный импульс начинался практически с момента действия высоковольтного

импульса, в то время как в случае одинакового направления поля и \vec{P}_S наблюдалась задержка $\approx 20 - 30$ нс (рис. 1), причем амплитудное значение тока уменьшалось примерно в 1.5–2 раза. При втором положении кристалла максимальная задержка достигала величины ≈ 300 нс, в то время как амплитуда токового импульса была всегда меньше, чем в первом положении кристалла (рис. 2). На некоторых токовых импульсах наблюдалась пиковая структура, которую можно объяснить неоднородностью поля вблизи краев электрода, где может происходить значительное усиление поля (рис. 2а). Независимо от длительности высоковольтного импульса длительность импульса тока эмиссии оставалась практически постоянной и составляла величину ≈ 300 нс. Возникновение столь большой задержки при втором положении кристалла можно трактовать как действие двойного электрического слоя, образующегося вблизи поверхности кристалла при эмиссии электронов.

В лазерных экспериментах использовалась вторая гармоника неодимового лазера на фосфатном стекле с длительностью импульса ≈ 4 нс и энергией в импульсе до 1 Дж. Интенсивность излучения второй гармоник на поверхности кристалла составляла величину $\approx 2.5 \cdot 10^8$ Вт/см². Измерения электронной эмиссии проводились при двух положениях кристалла: с вектором спонтанной поляризации, направленном навстречу лазерному излучению, и в противоположном направлении. В обоих случаях задержки между началом лазерного импульса и импульсом тока не наблюдалось, однако амплитуда тока во втором случае была более чем в два раза больше (рис. 3). В первом случае ток определялся, в основном, снимаемым экранирующим зарядом, во втором – пространственным зарядом и электронами проводимости. Максимальная плотность тока в лазерных экспериментах составила величину ≈ 150 А/см².

Таким образом, проведенные эксперименты показали возможность использования электронных эмиттеров на основе сегнетоэлектрических кристаллов для создания рентгеновских источников субмикросекундной длительности, управляемых электрическим полем и лазерным излучением.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты: 98-02-17386-а, 00-02-16113-а, 01-02-17589-а).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gundel H., Riege H., Wilson E. J. N. *Nukl. Instruments and Methods in Phys. Res.*, **A280**, N 1, 1 (1989).

- [2] Айрапетов А. Ш., Красных А. К., Левшин И. В., Никитский А. Ю. Письма в ЖТФ, **16**, по. 5, 46 (1987).
- [3] Rozenman G. and Rez I. J. Appl. Phys., **73**(4), 1904 (1993).
- [4] Kogobkin Yu. V., Rozanov V. B., Vergunova G. A., Shikanov A. S. The Russian J. of Laser Research, N 3, 101 (1998).
- [5] Lines M. E., Glass A. M. Principles and Methods in Phys. Res., **A280**, N 1, 1 (1989).
- [6] Merz W. J. J. Appl. Phys., **27**, 938 (1956); Phys. Rev., **88**, 421 (1952); Phys. Rev., **95**, 690 (1954).
- [7] Janovec V. Czech. J. Phys., **9**, 468 (1959).
- [8] Handerek J., Roleder K. Ferroelectrics, **76**, 159 (1987).
- [9] Проскуровский Д. И., Янкелевич Е. Б. ПТЭ, N 5, 108 (1973).

Поступила в редакцию 22 октября 2001 г.