

- [3] Ageev V.P., Chernishchev A.F., Gorbunov A.A., Kuzmichov A.V., Orlikovskiy A.A. Trends in Quantum Electronics, Proceedings of the 2nd Conference, Bucharest, 1985, p. 253.

Поступило в Редакцию  
23 ноября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 4

26 февраля 1988 г.

### СНИЖЕНИЕ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО КРИСТАЛЛА

В.Н. Смирнов

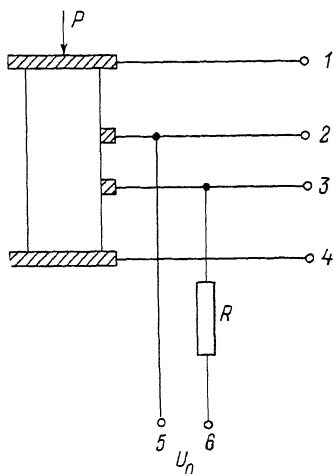
Воздействие импульсов оптического излучения на поверхность твердого тела с интенсивностью  $q$ , превышающей некоторое пороговое значение  $q^*$ , сопровождается образованием плазмы низкорогового оптического пробоя (НОП) воздуха, окружающего облучаемое тело [1]. Порог НОП существенно ниже порога пробоя воздуха вдали от поверхности тела. В ряде моделей [1, 2] в развитии НОП выделяют два основных этапа: появление у поверхности твердого тела первичных электронов и лавинообразное нарастание их концентрации в электрическом поле излучения. При этом обычно считается, что появление первичных электронов у поверхности непоглощающих материалов обусловлено термоэлектронной эмиссией при нагреве поглощающих неоднородностей (ПН) поверхностного слоя до  $\sim 10^4$  К [2]. Другая точка зрения на причину появления первичных электронов вблизи поверхности прозрачного диэлектрика сводится к тому, что они обусловлены экзоелектронной [3] или механоэмиссией из образующихся в поверхностном слое трещин [4-6]<sup>1</sup> вблизи ПН, нагреваемых лазерным излучением до умеренных температур. В настоящей работе приведены результаты экспериментов, выполненных с целью обнаружения влияния пластического деформирования кристалла вплоть до растрескивания на величину порога НОП.

Основные эксперименты проведены при атмосферном давлении воздуха на образцах *NaCl* размерами 15 x 7 x 7 мм, полученных скалыванием. В экспериментах использовался  $\text{CO}_2$  лазер, характеристики излучения которого описаны в [7]. Деформирование образца вплоть до растрескивания вызывалось ударом груза весом  $\rho > 200$  г, падавшего с высоты 30 см.

---

<sup>1</sup>См. также литературу к [5, 6].

Рис. 1. Схема деформирования образца и регистрации разностей потенциалов, возникающих на его гранях.  $P \approx 0.2$  кг,  $R = 1$  МОм.



Для выяснения влияния на  $\varphi^*$  электронов, сопровождающих деформирование и разрушение образца, необходимо было обеспечить синхронизацию лазерного импульса с интервалом времени, соответствующим высокой концентрации механоэлектронов. При этом следует иметь в виду, что обычно механоэмиссия твердых тел исследуется в вакууме. Именно в этих условиях разрушение образцов сопровождается эмиссией электронов и положительных ионов с высокими энергиями, нейтральных частиц и фотонов, включая рентгеновские.<sup>2</sup> При разрушении же на воздухе, например, щелочно-галогидных кристаллов обычно наблюдаются триболюминесценция, радиочастотное излучение, сопровождающее возникновение электрических разрядов в трещинах, и электризация разрушаемого образца, обнаруживаемая, например, путем регистрации разности потенциалов на гранях образца и обусловленная движением заряженных дислокаций [9]. Этим же процессом в [10] объясняется возникновение зарядов на стенках образующихся трещин. Авторы [11] считают, что последние обусловлены неоднородным распределением в объеме реального кристалла многозарядных ионов и вакансий. Сказанное позволяет также ожидать возрастания проводимости воздуха вблизи поверхности разрушаемого образца.

В экспериментах, предшествовавших исследованиям НОП, исследовались форма вспышек триболюминесценции, импульсов радиочастотного излучения, регистрировавшегося на выводах катушки, окружающей разрушаемый образец, и импульсов напряжения на обкладках конденсатора (рис.1, выводы 1 и 4), между которыми находился образец. Выводы 2, 3, 5 и 6 и соответствующие им контакты в средней части образца в этих экспериментах и при исследованиях оптического пробоя отсутствовали, они использовались в исследованиях изменений проводимости приповерхностного слоя воздуха, обусловленных деформированием кристалла. Упомянутые предварительные исследования проводились, в частности, с целью выяснения удобства использования этих сигналов для синхронизации запуска лазера. Пиковые значения сигналов на обкладках конденсатора (емкостью  $\sim 0.2$  пф) при непосредственной подаче их на

<sup>2</sup>По механоэмиссии см. литературу к [5, 8].

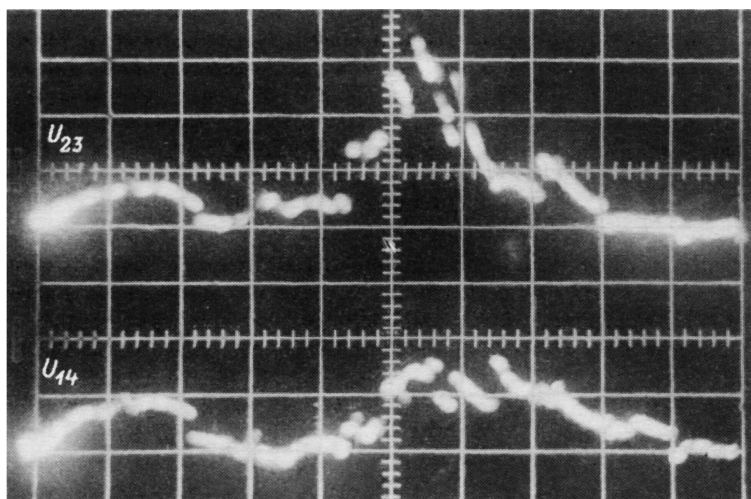


Рис. 2. Осциллограммы  $U_{14}$  и  $U_{23}$  при  $U_0 = 0, 2.5$  В/дел., 100 мкс/дел.

вход осциллографа ( $R_{вх} = 0.5$  МОм,  $C_{вх} = 50$  пФ) кабелем с  $C_k = 100$  пФ достигали нескольких В. Эти импульсы оказались наиболее удобными для запуска системы синхронизации поджига разряда лазера, позволявшей смешать импульс лазера относительно начала импульса напряжения на гранях деформируемого кристалла.

В ходе экспериментов, проведенных при диаметре облучаемой области  $d' = 0.25$  мм, были измерены порог оптического пробоя воздуха вдали от поверхности образца ( $1300 \pm 300$  МВт/см<sup>2</sup>) и порог НОП ( $\varphi^* = 170 \pm 20$  МВт/см<sup>2</sup>) при фокусировке лазерного излучения на поверхность образцов, не подвергавшихся механическим воздействиям. При воздействии импульсов излучения на поверхность образца в условиях его пластического деформирования вплоть до появления трещин, когда лазерный импульс оказывался в пределах интервала времени, соответствовавшего наличию на гранях кристалла разности потенциалов порядка нескольких В (рис. 2,  $U_{14}$ ),  $\varphi^*$  снижался до 90 МВт/см<sup>2</sup>. В ряде опытов наблюдалось снижение порога пробоя воздуха до 300 МВт/см<sup>2</sup> при прохождении пучка параллельно боковой грани образца на расстояниях от нее порядка  $d'$ . При  $d' = 0.5$  мм  $\varphi^*$  снижался от  $130 \pm 20$  МВт/см<sup>2</sup> до 70 МВт/см<sup>2</sup>. При отсутствии механического воздействия или нарушенной синхронизации столь низких значений  $\varphi^*$  не наблюдалось. Кроме того, деформирование образцов в ряде случаев приводило к снижению порога образования ярких вспышек свечения плазмы в объеме облучаемого образца.

Невоспроизводимость условий деформирования и растрескивания образцов не позволили провести исследования зависимостей порога НОП от расстояния области фокусировки от поверхности образца и

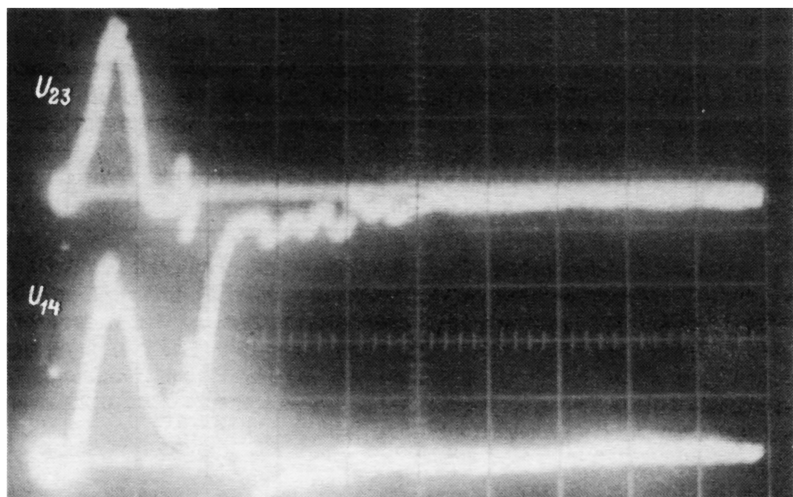


Рис. 3. Осциллограммы  $U_{14}$  и  $U_{23}$  при  $U_0 = 1.3$  кВ. 1 В/дел., 250 мкс/дел.

величины задержки между началом деформирования образца и лазерным импульсом. Наблюдавшееся снижение порога НОП согласуется с высказывавшейся в [3-6] точкой зрения на возможность участия в развитии пробоя механоэлектронов, эмитируемых из образующихся трещин в поверхностном слое облучаемого образца. Наблюдения в микроскоп показали, что среднее расстояние между хорошо различимыми трещинами не всегда было меньше размера облучаемой области (особенно при  $d = 0.25$  мм). В связи с этим, если считать, что снижение  $\varphi^*$  обусловлено механоэлектронами, то следует принимать во внимание не только электроны, эмитируемые трещинами непосредственно в пределы облучаемой области (или диффундирующие в нее вдоль поверхности), но и электроны, эмитируемые при пластической деформации без образования хорошо различимых трещин [12].

Для дополнительной проверки появления заряженных частиц у поверхности разрушаемого образца проведена серия экспериментов по наблюдению изменений проводимости вблизи его поверхности. Для этой цели помимо основных контактов (к торцам образца) к средней его части прижимались две узкие полоски фольги на расстоянии друг от друга  $\sim 1.5$  мм. К точкам схемы 5 и 6 (рис. 1) прикладывалось постоянное напряжение  $U_0$  до 1.5 кВ. Сигналы, обусловленные электризацией образца при деформировании, с контактов 1, 4 и 2, 3 подавались на осциллограф. Ожидалось, что изменения проводимости в случае появления свободных зарядов должны сопровождаться при  $U_0 \neq 0$  появлением дополнительных электрических сигналов, обусловленных смещением этих зарядов в приложенном поле.

Эксперименты показали, что при  $U_0 = 0$  наблюдается корреляция формы сигналов  $U_{14}$  и  $U_{23}$ , подаваемых на осциллограф с точек 1, 4 и 2, 3 (рис. 2), хотя полного подобия формы сигналов практически не наблюдалось. При  $U_0 \neq 0$  появлялись существенные отличия осциллограмм  $U_{14}$  и  $U_{23}$  в виде резких выбросов вниз сигналов  $U_{23}$  (рис. 3), соответствовавших росту проводимости воздуха, т.е. появлению у поверхности свободных заряженных частиц и, возможно, инициированию микропробоев. Особенно наглядно об этом свидетельствовали случаи, когда упомянутым выбросам на осциллограмме  $U_{23}$  соответствовал сигнал противоположной полярности на осциллограмме  $U_{14}$ . При  $U_0 > 1.3$  кВ и  $U_{14} > 0$  такие отличия наблюдались более, чем в 50% случаев.

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально показано, что появление заряженных частиц у поверхности диэлектрика, обусловленных пластической деформацией и растрескиванием, приводит к снижению порога плазмообразования, инициируемого лазерным излучением. Это означает, что одним из механизмов снижения порога оптического пробоя, реализующихся у поверхности твердого тела, в случае хрупких диэлектриков может быть механизм, обсуждавшийся в [5, 6], в соответствии с которым к эмиссии мезаноэлектронов, снижающих порог НОП, ведет образование микротрещин вблизи поглощающих неоднородностей поверхностного слоя, нагреваемых лазерным излучением до температур, существенно меньших  $10^4$  К, упоминаемых в [2].

Автор благодарен А.М. Бонч-Бруевичу за интерес к работе и полезные обсуждения.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Бонч-Бруевич А.М., Диденко И.А., Капорский Л.Н. - Препринт № 13 ИТМО АН БССР, Минск, 1985, 59 с.
- [2] Walters C.T., Barnes R.N., Beverly R.E. III. - J. Appl. Phys., 1978, v.49, N 5, p.2937-2949.
- [3] Крутякова В.П., Смирнов В.Н. - ЖТФ, 1978, т. 48, № 4, с. 844-852.
- [4] Крутякова В.П., Смирнов В.Н. - Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, № 22, с. 1190-1195.
- [5] Смирнов В.Н. - ЖТФ, 1978, т. 48, № 9, с. 1977-1979.
- [6] Смирнов В.Н. - ОМП, 1986, № 7, с. 1-4.
- [7] Бонч-Бруевич А.М., Смирнов В.Н. - ЖТФ, 1984, т. 54, № 11, с. 2184-2189.
- [8] Diskinson J.T., Brix L.B., Jensen L.C. - J. Phys. Chem., 1984, v. 88, N 9, p. 1698-1701.
- [9] Meyer K., Obrickat D., Rossberg M. - Kristall und Technik, 1970, b. 5, N 2, s. 181-205.

- [10] Молоцкий М.И. - Изв. СО АН СССР, серия химическая, 1983, № 12(372), в. 5, с. 30-40.
- [11] Frölich F., Seifert P. - Cryst. Lattice Defects, 1971, v. 2, N 4, p. 239-242.
- [12] Закревский В.А., Шулдинер А.В. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 3, с. 139-144.

Поступило в Редакцию  
1 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 4

26 февраля 1988 г.

РАЗДЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ  
НЕРАВНОВЕСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК  
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.Б. Федорцов, Ю.В. Чуркин

Время жизни носителей тока является одним из основных физических параметров полупроводника, определяющих работу ряда полупроводниковых приборов. В связи с неотработанностью технологии изготовления электрических контактов к новым полупроводниковым материалам и в связи с тем, что сам процесс изготовления контактов может изменять величину времени жизни, а также из-за того, что существует необходимость контроля этого параметра в процессе изготовления полупроводниковых приборов, в последнее время интенсивно развиваются бесконтактные (прежде всего оптические) методы контроля времени жизни [1, 2]. Предложенный в [2] метод позволяет проводить измерения на достаточно тонких плоскопараллельных образцах, он позволяет определить времена жизни неравновесных электронов  $\tau_n$  и неравновесных дырок  $\tau_p$  в случае их равенства или в случае сильного неравенства величин  $\tau_n$  и  $\tau_p$ .

Ниже предлагается интерференционный метод одновременного определения величин  $\tau_n$  и  $\tau_p$ , не требующий предварительных предположений об их соотношении. Как и в работе [2], образцы должны быть плоскопараллельными. Это требование выполнить довольно несложно. В частности, ему удовлетворяют не только полированные пластинки, используемые для производства интегральных микросхем, но даже шлифованные образцы в случае использования в качестве оптического зонда достаточно длинноволнового излучения. Более подробно требования к геометрии образцов сформулированы в [3, 4]. Аналогично работе [2] через образец пропускается зондирующий монохроматический луч инфракрасного лазера, на длине волны которого  $\lambda_3$  образец прозрачен (см. рисунок). Интенсивность прошедшего через образец монохроматического зондирующего луча измеряется фотоприемником. Кроме того, зондируемая область образ-