

МИКРОВОЛНОВЫЙ ПРОБОЙ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ИНИЦИИРОВАННЫЙ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ РАЗРЯДОМ

Г.М.Батанов, В.А.Иванов, М.Е.Коньжев

Институт общей физики РАН

117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 марта 1994 г.

В одиночных импульсах микроволнового излучения обнаружен новый вид пробоя – контрагированный разряд по поверхности кристаллов, сопровождающийся сильным (до 100%) поглощением излучения, испарением и ионизацией материала образцов. Пробой предшествует нерезонансный вторично-эмиссионный разряд (ВЭР). По оценкам при пробое концентрация электронов в зоне проводимости кристалла достигает 10^{21} см $^{-3}$. Предполагается, что пробой обусловлен накоплением в течение ВЭР высокой концентрации нестационарных центров окраски.

Высокий уровень электронных возбуждений в твердых телах, достигаемый тем или иным способом, позволил наблюдать в последние десятилетия новые физические явления и объекты, такие, например, как лазерная генерация света, электронно-дырочные капли и плазменный резонанс на неравновесных носителях заряда в полупроводниках. В ионных кристаллах была обнаружена фундаментальная плазменная люминесценция и высокоэнергетическая проводимое кристаллов [1]. В настоящей работе сообщается о поверхностном микроволновом пробое кристаллов в вакууме в условиях возбуждения приповерхностного слоя диэлектрика электронами вторично-эмиссионного разряда (ВЭР).

Известно, что в вакууме в микроволновых полях на поверхности диэлектриков развивается специфическая форма электронного разряда – нерезонансный ВЭР [2]. Механизм его развития связан с размножением электронов при их бомбардировке поверхности. Условием возникновения нерезонансного ВЭР является превышение энергии осцилляций электронов $\mathcal{E}_{\sim} = e^2 E_0^2 / 2m\omega_0^2$ той энергии электронов \mathcal{E}_1 , при которой коэффициент вторичной эмиссии диэлектрика равен единице (e , m – удельный заряд и масса электрона, ω_0 – круговая частота поля, E_0 – его амплитуда). И хотя коэффициент поглощения микроволновой мощности (отнесенный к единице площади мишени) в ВЭР невелик: $\eta \sim eE_0/m\omega_0 c \sim 10^{-2}$, высокие плотности тока (~ 1 А/см 2) и малые глубины проникновения электронов ($\sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ см при $\mathcal{E}_{\sim} \approx 100$ эВ) приводят к высокой плотности электронных возбуждений в кристалле ($\sim 10^{21}$ см $^{-3}$) за время длительности импульса излучения $\sim 10^{-5}$ с. В этих условиях нам удалось наблюдать поверхностный пробой ионных кристаллов при полях, на два порядка меньших полей при лазерном пробое или при пробое в квазипостоянных полях.

Схема эксперимента представлена на рис.1. Сколотые или полированные кристаллы фтористого лития или хлористого натрия размерами $70 \times 10 \times 5$ мм через запредельный патрубок помещались в максимум электрического поля стоячей TE_{10} волны прямоугольного волновода сечением $12 \times 5,7$ см, откачиваемого титановыми насосами до давления 10^{-6} торр. Импульс микроволнового излучения длительностью τ от 1 до 60 мкс и мощностью P_0 до 5 МВт поступал от магнетрона по волноводному тракту в вакуумную секцию. Магнетрон был развязан от секции с помощью ферритовых вентиляей. Длина волны в волноводе $\lambda_g = 20$ см. Частота следования импульсов регулировалась от одиночных (0,1 Гц и менее) до 2 Гц. Многосеточный анализатор регистрировал ток

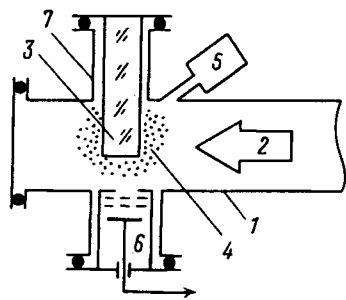


Рис.1

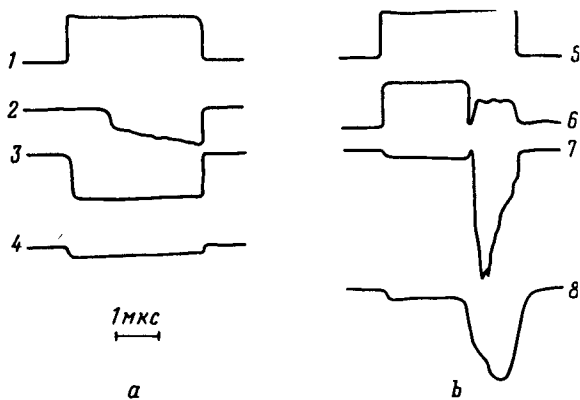


Рис.2

Рис.1. Схема эксперимента: 1 – волновод, 2 – микроволновое излучение, 3 – кристалл LiF, 4 – микроволновый разряд, 5 – ФЭУ-79, 6 – многосеточный электростатический анализатор, 7 – заградительный патрубок $\varnothing = 24$ мм

Рис.2. Типичные осциллограммы сигналов при микроволновом разряде на поверхности кристалла LiF. а (для случая ВЭР): 1 – мощность падающего микроволнового излучения, 2 – электронный ток из области разряда вблизи порога возникновения ВЭР ($P_0 = 45$ кВт, $E_0 = 2,3$ кВ/см), 3, 4 – электронный ток и свечение из области разряда при превышении порога возникновения ВЭР в 6 раз ($P_0 = 280$ кВт, $E_0 = 5,7$ кВ/см); б (для случая ПФР): 5,6 – мощность падающего и отраженного микроволнового излучения, 7, 8 – электронный ток и свечение из области разряда вблизи порога микроволнового пробоя и перехода ВЭР в ПФР ($P_0 = 300$ кВт, $E_0 = 5,9$ кВ/см); отношения коэффициентов усиления сигналов на осциллограммах 2, 3, 7 составляют соответственно 260 : 13 : 1

электронов, эмиттированных с поверхности кристалла (на стадии ВЭР) или из области плазменно-факельного разряда (ПФР), возникающего в результате микроволнового пробоя кристалла. Свечение кристалла или плазмы регистрировалось с помощью ФЭУ-79. Сигналы падающей и отраженной микроволновой мощности регистрировались с помощью направленных ответвителей.

Возникновение ВЭР происходило при превышении пороговой мощности и регистрировалось по возникновению сигналов свечения кристалла и электронного тока на коллектор многосеточного анализатора (рис.2а). Пороговые поля при этом соответствовали условию возникновения нерезонансного ВЭР [2] и составляли около 2 кВ/см. Визуально на этой стадии разряда наблюдалось однородное по поверхности кристалла слабое свечение люминесценции, вызванное электронами ВЭР. Увеличение длительности τ или мощности P_0 импульса приводило к пробую кристалла и образованию плазменного факела. Отметим, что время запаздывания пробоя $\Delta\tau \leq \tau$ подчиняется эмпирической зависимости: $(S_0 - S_{min}) \cdot \Delta\tau = \text{const}$, где S_{min} – пороговая интенсивность для возникновения ВЭР (обратно пропорциональная квадрату длины волны микроволнового излучения), а величина константы определяется природой кристалла.

Пробой сопровождался сильным поглощением микроволновой энергии с характерным временем $\delta\tau \sim 0,1$ мкс, мощной вспышкой свечения и всплеском электронного и ионного токов на коллектор многосеточного анализатора (рис.2б). Визуально на поверхности кристалла наблюдался ярко светящийся контрагированный разряд, вытянутый вдоль вектора электрического поля волны (рис.3). Используя для регистрации оптического излучения разряда два ФЭУ-79, щели коллиматоров которых были ориентированы поперек кристалла

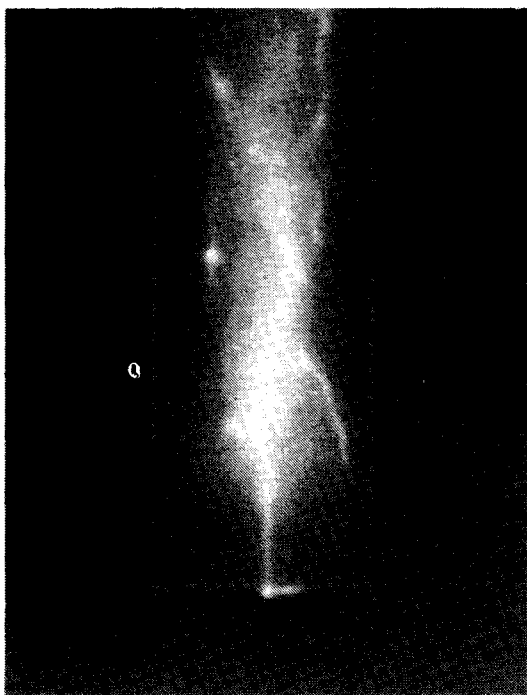


Рис.3. Фотография контрагированного разряда при пробое кристалла LiF

и разнесены вдоль, мы установили, что скорость распространения свечения при формировании канала составляет $5 \cdot 10^8$ см/с. Эта величина на порядок превышает максимальную скорость развития поверхностного пробоя диэлектриков в постоянных электрических полях.

Каждый пробой приводил к испарению вещества образцов. При этом на поверхности кристаллов появлялись эрозионные каналы диаметром несколько мкм. Прецизионное взвешивание образцов после 10^4 импульсов показало, что при пробое в среднем за импульс испарялось $10^{17} - 10^{18}$ атомов/см². После воздействия на образец 10^4 импульсов ВЭР заметной эрозии не обнаружено, но наблюдалось интенсивное поверхностное окрашивание кристалла, вызванное образованием F^- и F_2^- центров окраски [3].

Сильное поглощение микроволновой мощности при формировании канала пробоя позволяет оценить нагрев вещества в канале и его удельную электропроводность σ . Нетрудно видеть, что энергия, приходящаяся на один узел решетки в канале пробоя, составляет ~ 6 эВ, если определить радиус канала a , исходя из теплопроводности кристалла и длительности пробоя. Такой высокий удельный энерговклад означает, что в канале пробоя происходят испарение, диссоциация и сильная ионизация вещества. Однако свечение канала разряда предшествует моменту возникновения сильного поглощения энергии. Если на этой ранней стадии развития канала пробоя коэффициент поглощения составляет 1%, то энергия, приходящаяся на один узел решетки, составит только 0,06 эВ, то есть порядка энергии оптического фонона. Поэтому состояние кристалла еще можно рассматривать как состояние твердого тела. Для этих условий нетрудно оценить проводимость канала Y , а по ней – удельную

проводимость σ из условия ([4], с.175)

$$Y/Y_0 = \sigma(16\pi\lambda_g/\omega_0 b_1)(\pi a/\lambda)^2 \sim 10^{-2}$$

и концентрацию электронов в зоне проводимости по формуле $n_e = m\sigma\nu_e/e^2$. Здесь Y_0 – волновая проводимость волновода, λ_g – длина волны в волноводе, $2b_1$ – ширина волновода, ν_e – частота рассеяния электронов на продольных оптических фононах. При $a = 10^{-4}$ см, $\nu_e = 10^{14}$ с $^{-1}$ ([5], с.134) получаем $\sigma = 5 \cdot 10^{15}$ с $^{-1}$, $n_e = 2 \cdot 10^{21}$ см $^{-3}$.

Механизм достижения столь высоких концентраций электронов нельзя объяснить накоплением электронно-дырочных пар за время ВЭР из-за высокой частоты их рекомбинации ($\sim 10^{12}$ с $^{-1}$) [1], хотя плотность электронных возбуждений в течение ВЭР составляет $\sim 10^{21}$ см $^{-3}$. Можно предположить, что при комнатной температуре более медленную релаксацию ($\sim 10^{-6}$ с) испытывают F -, H -, V - и I -центры, на генерацию которых в основном и расходуется энергия электронно-дырочных пар и экситонов [6]. В этом случае накопление центров окраски и их последующая рекомбинация с образованием электронов приводит к росту электронной концентрации [6], с.131). Как только концентрация электронов превышает уровень, при котором мнимая часть диэлектрической проницаемости равна единице ($\omega_{L_e}^2 > \omega_0\nu_e$, ω_{L_e} – ленгмюровская частота электронов), на неоднородностях плотности электронов возникают области локального усиления поля. Это приводит к резкому локальному росту концентрации электронов вследствие роста электронной температуры и уменьшения скорости рекомбинации электронно-дырочных пар. В приповерхностном слое кристалла формируется своеобразный микроволновый "стример", вытянутый вдоль вектора электрического поля. Увеличение энергии электронов в "стримере" из-за локального усиления поля вызывает разогрев решетки в этой области с последующей взрывной рекомбинацией центров окраски и образованием канала пробоя. Необходимая для начала процесса "затравочная" концентрация электронов в зоне проводимости составляет $n_e \sim 10^{15}$ см $^{-3}$, для чего достаточна концентрация нестационарных F -центров порядка 10^{17} см $^{-3}$, что заведомо выполняется в нашем случае [3].

В качестве альтернативного механизма пробоя диэлектриков нами был рассмотрен микроволновый пробой в газе, который выделяется с поверхности кристаллов вследствие электронно-стимулированной десорбции на стадии ВЭР. Экспериментальные результаты и оценки показывают, что реализация этого механизма требует увеличения интенсивности микроволнового излучения на три порядка по сравнению с используемыми в наших экспериментах. Таким образом, пробой кристаллов в микроволновых полях, на два порядка меньших статических пробивных полей, обусловлен образованием электронно-дырочной плазмы с высокой концентрацией носителей ($10^{19} \div 10^{21}$ см $^{-3}$), возникающей вследствие релаксации метастабильного состояния ансамбля неравновесных дефектов решетки, индуцированных ВЭР.

1. Высокоэнергетическая электроника твердого тела. /Под ред. Д.И.Вайсбурда. Новосибирск: Наука, 1982.
2. Л.В.Гришин, А.А.Дорофеюк, И.А.Косый и др., Труды ФИАН **92**, 82 (1977).
3. Г.М.Батанов, В.А.Иванов, М.Е.Коньжев и др., Письма в ЖТФ **19**, 42 (1993).
4. В.Е.Голант. Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968.
5. Ф.Б.Басс, Ю.Г.Гуревич, Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975.
6. Ч.Б.Лушик, А.Ч.Лушик. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989.