

УДК 621.382.03

Л.Н. Орликов, В.Я. Романов, С.И. Арестов, С.М. Шандаров

Исследование способов управления генерацией электронного потока из ниобата лития при термоциклировании

Рассматривается возможность управления генерацией электронного потока, возникающего при нагреве или остывании ниобата лития за счет изменения локального или общего давления, и обеспечения локальной формы потока плазмы на образце.

Ключевые слова: разряд, источник электронов, поток плазмы.

В настоящее время основная элементная база оптоэлектроники и оптоинформатики выполняется на кристаллах типа ниобата лития, танталата висмута и др. При изменении температуры внешней среды (термоциклировании) в кристаллах могут наблюдаться явления испускания видимого и невидимого излучения, что оказывает влияние на параметры оптоэлектронного прибора в целом. Известен эффект спонтанной кратковременной генерации слаботокового (до 10 нА) потока электронов при остывании кристалла ниобата лития в области температур 300–500 К [1]. Это связано с тем, что при изменении температуры кристалла происходит изменение его кристаллической структуры, сопровождающееся появлением разности потенциалов вдоль полярной оси кристалла. Под действием возникшей разности потенциалов в вакууме возможны ионизация остаточного газа, возникновение газового разряда и генерация частиц (электронов или ионов) в направлении линий напряженности поля. Предполагается, что основную часть тока составляют электроны, поскольку коэффициент ионизации невелик ($\sim 10^{-2}$ – 10^{-4}) и доля ионного тока пренебрежительно мала.

Суть проблемы. Однако момент генерации электронов при нагреве или остывании кристалла нестабилен во времени, недостаточно известны параметры генерируемого излучения. Недостаточно исследованы условия, при которых возможно управление моментом генерации электронов. Для реализации вольт-амперной характеристики источника электронов на пирозффекте важна реализация напряжения с определенным током. Отсутствие тока (холостой ход) или отсутствие напряжения (режим короткого замыкания) свидетельствуют о неработоспособности источника электронов.

Метод решения. При работе оптоэлектронного прибора в вакуумной оболочке, помимо самопроизвольной реализации генерации, представляется перспективным управление моментом генерации путем подачи порции газа или плазмы в окрестность кристалла. Для анализа управления используется модель [1], основанная на возникновении напряженности электрического поля при изменении температуры кристалла, с последующим пробоем и ионизацией газа и эмиссией электронов из плазмы.

Проведенные исследования. Исследования проводились с использованием рекомендаций [2] на типовой вакуумной установке ВУП-4. На рис. 1 представлена схема эксперимента.

Для экспериментов использовался кристалл ниобата лития диаметром 6 мм и длиной 14 мм. На расстоянии 5 мм от кристалла располагался анод, а затем коллектор в виде цилиндра Фарадея. В ряде случаев на цилиндр Фарадея помещались люминофор типа БМ-4 и рентгеновская фотопленка. Для оценки потенциала на кристалле использовался калиброванный электроскоп в виде двух нитей с бусинками диаметром 1 мм. Импульсное давление газа оценивалось по осциллограмме тока с электроразрядного датчика давления.

В вакуумной камере обеспечивалось давление 0,01–10 Па. Нагреватель 1 обеспечивает нагрев кристалла ниобата лития 2 со скоростью ~ 2 –10 град/мин до 573 К.

Поток электронов, проходя полый анод 3, попадает на коллектор 4. Сигнал с резистора 9 попадает на ламповый усилитель 5 и ждущий осциллограф С8-14 6. Фрагменты осциллограмм записываются на видеокамеру 7 и обрабатываются на ЭВМ 8. Генератор импульсов газа представляет со-

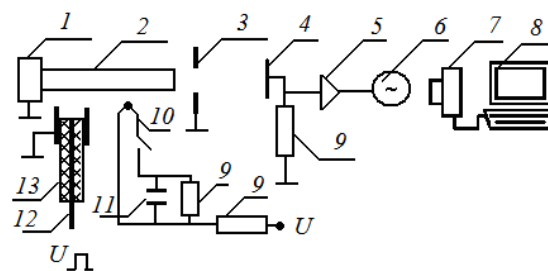


Рис. 1. Схема эксперимента

бой никелевую проволочку 10, нагреваемую импульсом тока 2 кА, 3 кВ, 300 мкс от коммутации ударной емкости 11 (5 кВ, 600 мкФ). Генератор плазмы представляет собой электрод 12 с иницированием пробоя по поверхности диэлектрика 13. Ускоряющий потенциал на коллектор электронов не подавался.

Режим 1. Самопроизвольная спонтанная генерация электронов

Большая скорость остывания кристалла в начальный момент (1–2 °/с) способствует возникновению напряжений в кристалле и провоцирует токи смещения и перезарядки, возникающие на частоте ~ 1 МГц. При остывании кристалла за счет собственной теплоемкости в области высокого вакуума (~ 0,01 Па) число генераций электронов не превышает пяти за весь промежуток остывания (10 мин). В области давлений ~ 10 Па частота генераций не превышает нескольких раз. Наибольшая частота и наибольшая интенсивность спонтанной генерации электронного потока наблюдаются при давлениях ~1 Па и температурах 425–375 К. Промежуточный интервал между излучениями составляет 1–3 мин. На рис. 2 представлены осциллограммы тока с коллектора при давлении 1 Па.

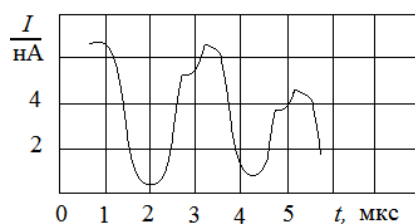


Рис. 2. Осциллограммы тока с коллектора при давлении 1 Па

Повторяющиеся осциллограммы свидетельствуют о пробое по газовому промежутку вдоль поверхности кристалла. «Проседание» осциллограммы вблизи максимума амплитуды свидетельствует об отборе тока. Реализуется напряжение 20–45 кВ с током до 10 нА.

При нагреве кристалла со скоростью ~ 10 град/мин амплитуда сигнала на порядок больше. Однако такой режим может привести к разрушению кристалла.

Режим 2. Газовое управление моментом генерации

Управление импульсным напуском газа. При обеспечении высокого вакуума (0,1 Па) принудительная подача импульса газа электромагнитным натекателем в область кристалла провоцирует пробой по кристаллу и позволяет преобразовать неуправляемый процесс генерации электронов в управляемый. Происходит ионизацию газа под действием градиента напряженности электрического поля и генерация электронного потока с напряжением ~ 25 кВ. Возможности газового управления ограничены скоростью откачки газа из вакуумной камеры. В условиях эксперимента при откачке камеры высоковакуумным насосом Н-5С достигнута частота генерации электронного потока 0,1 Гц при импульсном потоке натекания 0,1 торл/с.

Управление импульсным выделением газа путем нагрева проводника. Теория управления базируется на импульсном выделении газа при импульсном нагреве материала. Поток газовыделения Q за время t определяется через объем камеры V и давление P соотношением [3]

$$Q = V(dP/dt) + P(dV/dt). \quad (1)$$

В первом приближении при постоянном объеме камеры импульсный поток газа определяется первым слагаемым. Известно, что поток десорбции газа из материала экспоненциально зависит от температуры.

Например, в [3] при прогреве пластин никеля толщиной 0,3 мм площадью 2 см² до температуры 1000 К выделяется поток (7–12)×10⁻⁶ торл/с газа, достаточный для покрытия такой поверхности 210 слоями газа. Сталь обеспечивает газовыделение на порядок больше. В спектре десорбированных газов преобладают углеводороды. Поэтому спектральный состав десорбированных газов не влияет на параметры ионизации и величину электронного тока с кристалла. Поток импульсного газовыделения должен обеспечить на величине пробега газовой молекулы λ_T изменение локального давления $dP \sim 10$ Па. За объем измененного локального давления принимался объем сферы с радиусом, равным длине свободного пробега молекулы. В условиях экспериментов расстояние от генератора газа до образца определялось по соотношению [3] для длины свободного пробега

$$\lambda_T = 5/P, \quad (2)$$

где λ_T – мм; P – давление, Па. В условиях эксперимента $\lambda_T = 5$ мм.

Генерация газа из никелевого проводника, нагреваемого импульсом тока, позволяет сократить период газовыделения до 100 мс по сравнению с электромагнитным натекателем. Такое газовыделение не сказывается на интегральном давлении газа в вакуумной камере. Режим импульсного газового управления хорошо реализуется при обеспечении высокого вакуума в рабочей камере. Недостатком такого управления оказывается постепенное обезгаживание никелевого образца.

Режим 3. Электрическое управление

Введение двух вспомогательных электродов в окрестность кристалла позволяет инициировать развитие разряда по поверхности пьезоэлектрика с последующим отбором тока. Время развития ионизационных процессов составляет 0,3–0,5 мкс. Время дрейфа частиц близко к 1 мкс. Минимальное расстояние от управляющей системы до образца определяется соотношением [3]

$$\lambda = 4\lambda_r \cdot \sqrt{2}. \quad (3)$$

Техническая реализация электрического управления осуществляется двумя электродами с междуэлектродным расстоянием 5 мм, введенными на расстоянии 10 мм. Напряжение зажигания вспомогательного разряда составляет 400 В при токе 1–5 мА в области давлений 1–10 Па. Особенностью электрического управления является необходимость экранирования паразитного плазменного потока, влияющего на измерение тока. Кроме того, напряжение зажигания зависит от давления и расстояния между электродами.

Режим 4. Плазодинамическое управление

Теория плазодинамического управления базируется на том, что в месте развития дугового разряда с электродов и междуэлектродной вставки происходит поверхностное испарение материала, активно проходят процессы десорбции газа. Известно, что плазменные потоки в момент формирования имеют структуру в виде циклов с максимальным и минимальным сечением [4–8]. Время установления стационарной структуры составляет от 5 до 40 мкс в зависимости от материала электродов и полярности. Локальное давление газа в месте разряда в несколько раз выше окружающего давления. Продольный размер первого цикла расширения плазменного потока X_m определяется соотношением [8]

$$X_m = (0,7 - 1,34)d(kP_j/P_k)^{0,5}. \quad (4)$$

Поперечный диаметр d_m плазменного потока в зависимости от тока дуги I сильноточного источника в диапазоне токов до 30 кА/см² описывается выражением [6]

$$d_m = d \cdot I^{0,3} (kP_j/P_k)^{0,5}, \quad (5)$$

где I – ток дуги, кА; d – диаметр диэлектрической вставки, мм; P_k – давление в вакуумной камере; P_j – давление на срезе дуговых электродов; k – показатель адиабаты газа. (Для источника с пробоем по диэлектрической вставке $k=1,3$; $P_j=1$ Па).

$$P_j = P_k [1 - (k-1)/(k+1)]^{k/(k-1)}. \quad (6)$$

Протяженность плазменного потока может достигать несколько десятков циклов при формировании электродов в виде сверхзвукового сопла. В эксперименте система плазодинамического управления представляла собой два электрода 12, 13 (см. рис. 1), разделенных керамической трубкой с толщиной стенки 3 мм. При пробое по поверхности керамики (3 кВ, 200 А, 20 мкс) возникает дуговой разряд. Плазма под действием повышенного локального давления выталкивается из зоны дугового разряда в область кристалла.

В режиме разовых коммутаций эффективность управления повышается на начальном участке остывания кристалла в высоком вакууме. Реализуемое напряжение может достигать более 50 кВ при токах ~10 нА и длительности ~1 мкс. При частоте инициирования 0,1 Гц напряжение и ток усредняются на уровне 25 кВ, 8 нА.

Режим 5. Световое управление

При освещении нагретого кристалла ультрафиолетовым излучением на его поверхности возникает напряжение на уровне 15–20 кВ. Эффективность управления повышается с уменьшением длины волны. В условиях эксперимента длина волны изменялась от 420 до 254 нм.

Полученные результаты и выводы. При повышении давления от 0,1 до 10 Па наблюдается увеличение эффективности управления всех методов. Вероятно, это связано с эффектом газового усиления. Наибольшие напряжения и токи спонтанной эмиссии наблюдаются в диапазоне 0,5–5 Па. Провоцирование пробоя по кристаллу позволяет преобразовать неуправляемый процесс генерации электронов в управляемый. Исследования показали, что для малой инерционности управления важна крутизна фронта изменения воздействующих параметров за времена, меньшие ионизационных и рекомбинационных процессов.

Заключение. В итоге работы получены новые сведения о возможности управления при генерации электронного потока в процессе нагрева или остывания кристалла. Это возникновение электри-

ческого поля по оси кристалла, пробой по поверхности, возникновение плазмы, ускорение частиц вдоль электрического поля. Вероятно, при работе оптоэлектронных приборов в условиях экстремальных температур и вакуума предпочтение следует отдавать одному из способов управления.

Работа выполнена при поддержке гранта 08-02-99-02 Р-ОФИ; проектов 2гб и 28/10 х/д.

Литература

1. Месяц Г.А. Электронная эмиссия из сегнетоэлектрических плазменных катодов // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, №1. – Приложение. – С. 85–108.
2. Москалев В.А. Измерение параметров пучков заряженных частиц / В.А. Москалев, Г.И. Сергеев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
3. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М.: Высшая школа, 1987. – 376 с.
4. Орликов Л.Н. Плазмодинамическое повышение эффективности вакуумно-дуговых генераторов // Тезисы 4-й Всерос. конф. по модификации свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц. Томск, 13–16 мая 1996 г. – Томск: Аудит Информ, 1996. – С. 246–247.
5. Орликов Л.Н. Динамическое управление сильноточными ионно-электронными источниками микросекундной длительности // Труды 4-й Междунар. конф. «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-98». Новосибирск, сент. 23–26, 1998 г. – Новосибирск: НГТУ, 1998. – С. 198–199.
6. Орликов Л.Н. Оптимизация управления потоком плазмы в сильноточном источнике частиц / Л.Н. Орликов, Н.Л. Орликов, С.М. Шандаров // Известия вузов. Физика. – 2007. – Приложение. – №9. – С. 260–263.
7. Orlikov L.N. Gas Discharges Generators of Ultra Frequency a Metall- Bearing Plasma to Etching of Piezoelectrics / L.N. Orlikov, N.L. Orlikov, S.M. Shandarov // Proceedings of the IEEE – Russia conference «1999 High- power microwave electronics» (MIA-ME99). Novosibirsk, september 21–23, 1999. – Novosibirsk, 1999. – P. III.22–III.23.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1976. – 808 с.

Орликов Леонид Николаевич

Д-р техн. наук, профессор каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87, 8-913-841-68-59

Эл. почта: Oln4@yandex.ru, ong@ef.fet.tusur.ru

Романов Василий Яковлевич

Магистрант каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: 8-923-401-70-46

Арестов Сергей Иннокентьевич

Аспирант каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87, 8-913-847-35-37

Шандаров Станислав Михайлович

Д-р физ.-мат. наук, зав. каф. электронных приборов ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-87

Orlikov L.N., Romanov V.Y., Arestov S.I., Shandarov S.M.

Research of methods of control electron emission out of lithium niobate in thermocycling

The ways of control of electron emission by injection of gas or plasma on warm lithium niobate are investigated.

Keywords: discharge, electron source, plasma flow.