

Генерация лазерного излучения в монокристаллах селенида цинка под действием субнаносекундных импульсов высокого напряжения

Г.А.Месяц, А.С.Насибов, В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин

Исследовано воздействие субнаносекундных импульсов высокого напряжения ($U = 50 - 200$ кВ, $t_p = 100 - 500$ пс) на плоскопараллельные пластины ZnSe толщиной 1–2 мм. Эксперименты проводились на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре. Образец помещался между катодным электродом и кольцевым анодом. Разряд распространялся в направлении силовых линий электрического поля. На фронте разряда и напротив катодного электрода возникала генерация лазерного излучения ($\lambda = 480$ нм). Средняя скорость распространения разряда достигала 5×10^8 см·с⁻¹, импульсная мощность была равна 600 Вт, расходимость излучения не превышала 2–3°. Развития стримерных разрядов, ориентированных вдоль кристаллографических направлений, в данном случае не наблюдалось.

Ключевые слова: стримерные лазеры, монокристаллы селенида цинка, электролюминесценция, субнаносекундные импульсы высокого напряжения.

1. Введение

При приложении импульсов высокого напряжения к монокристаллическим пластинам полупроводниковых соединений, помещенным в диэлектрическую среду, в них наблюдается распространение светящихся нитевидных разрядов (стримеров), ориентированных в определенных кристаллографических направлениях [1]. Диаметр стримера не превышает нескольких микрометров. В «головке» стримера, перемещающейся со скоростью $10^8 - 10^9$ см·с⁻¹, возникают условия для усиления и генерации лазерного излучения. Плотность неравновесных носителей в ней достигает $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, а интенсивность лазерного излучения – 10^9 Вт·см⁻² [2]. Столь высокую плотность неравновесных носителей может обеспечить ударная ионизация или туннельный эффект в сильном электрическом поле.

Исследованию особенностей стримерных разрядов в различных полупроводниковых материалах посвящены работы [1–6]. К достоинствам стримерных лазеров относятся простота устройства, высокая интенсивность излучения, а также возможность формирования регулируемых по длительности пикосекундных импульсов и получения генерации лазерного излучения в широком оптическом диапазоне – от УФ до ИК области спектра [3]. Несмотря на перечисленные достоинства, стримерные лазеры не нашли пока широкого применения. Этому препятствуют их существенные недостатки – необходимость использования диэлектрической жидкости или вакуума, в которые помещают полупроводниковые кристаллы, а также развитие разряда в виде тонких нитей, что опреде-

ляет значительную расходимость излучения и трудности получения объемной генерации.

Известно, что прочность различных сред на пробой значительно возрастает при использовании субнаносекундных импульсов напряжения [7]. Это позволило работать на воздухе, уменьшить расстояние между электродами и обеспечить условия, в которых разряд распространяется по направлению силовых линий электрического поля вдоль поверхности полупроводника. При этом отпала необходимость помещать кристалл и электрод в жидкую диэлектрическую среду, а следовательно, появились дополнительные возможности ионизации полупроводника излучением разряда и электронным пучком, образующимися в разрядном промежутке при приложении высоковольтных субнаносекундных импульсов [8].

2. Методика и результаты экспериментов

В экспериментах использовался высоковольтный пикосекундный генератор импульсов напряжения с перестраиваемыми параметрами, разработанный в Институте электрофизики УрО РАН [7, 8], и коаксиальная приставка, специально изготовленная для этой цели. Базовым элементом установки являлся генератор наносекундных импульсов РАДАН-303Б [9] с дополнительным блоком компрессии энергии, оснащенный устройством обострения фронта импульса и уменьшения его длительности с помощью газовых разрядников высокого давления [10]. Пикосекундный генератор позволял регулировать амплитуду волны напряжения, бегущей по выходному коаксиалу в направлении катодного электрода (КЭ) (далее – бегущая волна) в интервале 20–250 кВ, при изменении ее длительности от 100 пс до 4 нс. Схема подачи субнаносекундных импульсов на монокристаллическую пластину ZnSe дана на рис. 1,а.

Методика эксперимента состояла в следующем. Изготовленные из монокристаллов ZnSe плоскопараллельные прямоугольные пластины размером 6 × 5 мм и толщиной 1 мм (рис. 1,а) устанавливались в коаксиальной ка-

Г.А.Месяц, А.С.Насибов. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: nasibov@sci.lebedev.ru
В.Г.Шпак, С.А.Шунайлов, М.И.Яландин. Институт электрофизики УрО РАН, Россия, 620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Поступила в редакцию 12 июля 2007 г., после доработки 11 сентября 2007 г.

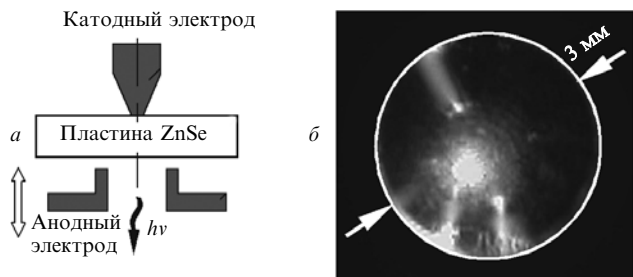


Рис.1. Схема возбуждения плоскопараллельной монокристаллической пластины ZnSe субнаносекундными импульсами высокого напряжения (а) и фотография ближней зоны генерации (б). Площадь точки контакта КЭ с пластиной ZnSe $\sim 1 \times 1$ мм, зазор между АЭ и пластиной ~ 1.5 мм. Напряжение $U_0 = 50$ кВ в бегущей волне, $t_p = 1.5 \times 10^{-10}$ с.

мере напротив КЭ, который плотно прижимался к пластине с помощью пружинного узла. Подвижный кольцевой анодный электрод (АЭ) устанавливался на расстоянии 0–1.5 мм от плоскости полупроводниковой пластины с противоположной стороны. Наблюдение генерации и измерение оптических характеристик (спектр, мощность, расходимость) производились через приосевое отверстие в АЭ диаметром 3 мм. Для измерения импульсной мощности излучения применялся коаксиальный фотозлемент ФЭК-22. Спектр излучения фиксировался спектрометром МС-120 с ПЗС-структурой и оптическим зондом. Разрешающая способность спектрометра не позволяла исследовать модовый состав импульса генерации. Импульсы напряжения и света регистрировались широкополосным осциллографом Tektronix TDS 6604 (6 ГГц, 20 Гс/с). Порог генерации определялся по резкому возрастанию мощности и направленности излучения, а также по сужению его спектра. Различные стадии развития свечения фиксировались цифровой фотокамерой.

Начиная с амплитуд 30–40 кВ в бегущей волне (длительность импульса на полувысоте $\sim 120 - 140$ пс), в направлении силовых линий от кромки КЭ к аноду развивались разряды. Синее свечение вначале возникало напротив КЭ, а затем – на фронте разряда, распространяющегося в сторону кольцевого АЭ. С увеличением амплитуды высоковольтного импульса появлялась генерация лазерного излучения. На рис.1,б приведена фотография пластины из ZnSe, генерирующей лазерное излучение под действием высоковольтного субнаносекундного импульса. Генерация обычно возникла напротив КЭ в пятнах диаметром 300–500 мкм. Средняя скорость распространения разрядов, рассчитанная по длине трека и времени воздействия напряжения, равнялась 5×10^8 см·с $^{-1}$.

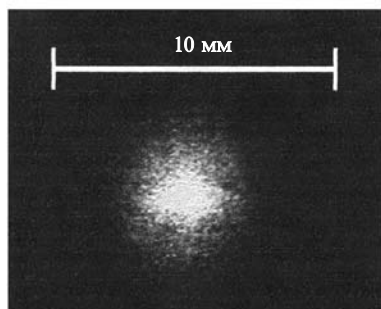


Рис.2. Фотография лазерного излучения пластины ZnSe, расположенной на расстоянии 40 мм от плоскости регистрации.

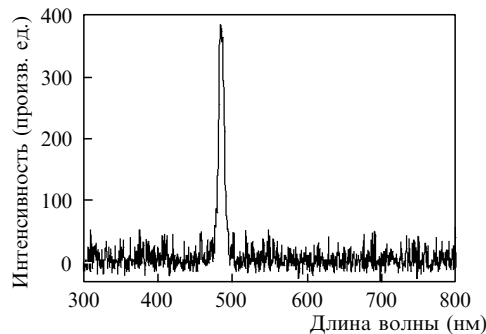


Рис.3. Спектр излучения пластины ZnSe.

На рис.2 представлена фотография дальней зоны излучения пластины ZnSe в режиме генерации на расстоянии 40 мм, угол расходимости излучения не превышал $2-3^\circ$. Спектр излучения пластины ($d = 1$ мм, $U_0 = 109$ кВ, $t_p = 1.5 \times 10^{-10}$ с, $T = 300$ К) приведен на рис.3. Максимальная импульсная мощность генерации, измеренная ФЭК-22, достигала 600 Вт.

3. Выводы

Проведенные эксперименты по воздействию субнаносекундных импульсов высокого напряжения на монокристаллы ZnSe продемонстрировали новые возможности возбуждения индуцированного излучения в полупроводниках и диэлектриках. В этом случае можно создать условия, когда незавершенный разряд распространяется вдоль поверхности, производя сильную ионизацию приповерхностного слоя. Образец подвергается действию электрического поля, светового излучения и электронного пучка, возникающих при развитии разряда в газе под действием субнаносекундного импульса высокого напряжения. Влияние перечисленных факторов на образец ранее детально не исследовалась и представляет научный и прикладной интерес. В дальнейшем авторы предполагают исследовать динамику процесса и влияние на эффективность излучения каждого из указанных факторов.

Авторы выражают благодарность сотрудникам института электрофизики УрО РАН А.В.Расуловой и В.И.Соломонову за помощь в проведении спектральных измерений и сотруднику Физического института им. П.Н.Лебедева РАН П.В.Шапкину за подготовку образцов селенида цинка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-12026-офи).

1. Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, 650 (1974).
2. Басов Н.Г., Молчанов А.Г., Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М. *ЖЭТФ*, **70**, 1751 (1976).
3. Насибов А.С., Обидин А.З., Печенов А.Н., Попов Ю.М., Фролов В.А. *Письма в ЖТФ*, **5**, 22 (1979).
4. Зубрицкий В.В., Яблонский Г.П., Грибковский В.П. *ФТП*, **17**, 402 (1983).
5. Гладышук А.А., Гурский А.Л., Паращук В.В. *ЖПС*, **42**, 890 (1985).
6. Гладышук А.А., Гурский А.Л., Паращук В.В., Пендюк С.А., Таленский О.Н., Яблонский Г.П. *ЖПС*, **44**, 978 (1986).
7. Месяц Г.А., Яландин М.И. *УФН*, **175**, 225 (2005).
8. Месяц Г.А., Коровин С.Д., Шарыпов К.А. и др. *Письма в ЖТФ*, **32**, 1 (2006).
9. Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. *Proc. IEEE*, **92**, 1166 (2004).
10. Яландин М.И., Шпак В.Г. *ПТЭ*, № 3, 5 (2001).