

Влияние импульсного лазерного излучения на морфологию и фотоэлектрические свойства кристаллов InSb

© В.А. Гнатюк^{*†}, Е.С. Городниченко

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,
01033 Киев, Украина

* Research Institute of Electronics, Shizuoka University
432-8011 Hamamatsu, Japan

(Получена 10 сентября 2002 г. Принята к печати 11 сентября 2002 г.)

Изучается влияние наносекундных импульсов излучения рубинового лазера на морфологию поверхности и фотоэлектрические свойства кристаллов InSb. Установлено значение пороговой плотности энергии 0.14 Дж/см^2 , при котором начинается плавление поверхности кристаллов. Анализируется модификация спектров и вида кинетики фотопроводимости образцов после облучения. Показано, что обработка InSb импульсами рубинового лазера в определенном диапазоне плотности энергии приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации, росту времени жизни неравновесных носителей и, как следствие, к увеличению фоточувствительности кристаллов.

Фотоприемники на основе полупроводникового соединения InSb широко используются для детектирования, измерения и контроля параметров излучения средней инфракрасной области спектра ($0.2\text{--}1.24 \text{ эВ}$). При изготовлении чувствительных элементов приемников поверхность полупроводника подвергается различным видам обработки для модификации его электрофизических свойств. Одним из способов оптимизации фотоэлектрических параметров полупроводников является импульсное лазерное облучение, эффективность применения которого обеспечивается локальностью и кратковременностью воздействия, высокой плотностью энергии, технологичностью и воспроизводимостью режимов обработки. Лазерное облучение InSb используется для отжига структурных несовершенств и механических напряжений, десорбции окисного слоя [1,2], создания приповерхностных областей, обогащенных или обедненных основными носителями, вплоть до конверсии типа проводимости и образования $p\text{--}n$ -переходов, как следствие модификации системы точечных дефектов полупроводника [3].

Важную роль при изучении механизмов лазерно-стимулированной трансформации дефектной структуры полупроводников играет определение лучевой стойкости полупроводникового кристалла [4]. Изучение этой характеристики позволяет получить необходимые данные для определения оптимальных режимов лазерного воздействия и представляет интерес для разработки прикладных методов в технологии полупроводниковой фотоэлектроники. Количественной характеристикой лучевой стойкости является порог разрушения, под которым в технологических процессах лазерной обработки понимают плотность энергии импульсов лазера E_{th} , при которой, как правило, начинается плавление поверхности материала [5]. По вопросу величины E_{th} при облучении InSb в литературе не существует единого мнения [2,3,6,7]. Экспериментальные значения E_{th}

при облучении антимонида индия наносекундными импульсами рубинового лазера, полученные из косвенных наблюдений ($0.14\text{--}0.22 \text{ Дж/см}^2$ [2,6]), ощутимо превышают расчетную для подобного воздействия величину $E_{th} \approx 0.08 \text{ Дж/см}^2$ [7].

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном определении порога плавления InSb и режимов лазерной обработки монокристаллов наносекундными импульсами излучения рубинового лазера, позволяющих модифицировать и оптимизировать фотоэлектрические характеристики полупроводника. Объектами исследования были монокристаллы $n\text{-InSb}$ с ориентацией поверхности (112), выращенные методом Чохральского. Образцы подвергались обработке одиночными импульсами рубинового лазера ($h\nu = 1.78 \text{ эВ}$) с длительностью 20 нс. Для гомогенизации излучения использовалась линза с матовой поверхностью. Плотность энергии импульсов лазера регулировалась нейтрально-серыми светофильтрами. В процессе лазерного воздействия контролировалась кинетика ФП и после каждой серии облучения образцов измерялись спектры фотопроводимости (ФП) при 77 К.

Установлено, что при воздействии на монокристаллы InSb импульсами рубинового лазера, начиная с плотности энергии $E = 0.15 \text{ Дж/см}^2$, наблюдаются различия в морфологии поверхности образцов до и после облучения. Сначала эти изменения имеют вид „островков“ с характерным металлическим блеском. С увеличением плотности энергии E они занимают всю область воздействия лазерного излучения (рис. 1). Причиной наблюдаемых эффектов может быть сначала локальное, а затем и полное плавление поверхностного слоя антимонида индия [2,6]. Известно, что необратимые нарушения морфологии поверхности сложных полупроводников при наносекундном лазерном отжиге могут быть обусловлены также выносом вещества в результате интенсивного испарения [8] и декомпозицией материала при лучевом нагреве до $T < T_m$ [9]. В случае InSb подобный процесс сопровождается потерей более ле-

[†] E-mail: gnatyuk@mailcity.com

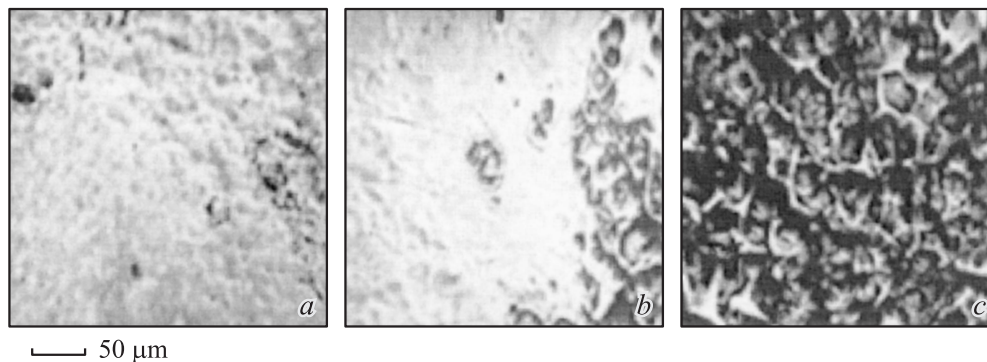


Рис. 1. Морфология полированной поверхности монокристаллов InSb до (a) и после (b, c) облучения наносекундными импульсами рубинового лазера с плотностью энергии E , Дж/см²: b — 0.15, c — 0.18.

тучей компоненты — Sb и плавлением легкоплавкой компоненты — In. Поэтому для определения значения плотности энергии E_{th} , при котором начинается плавление поверхности InSb, использовалась методика прямого наблюдения, суть которой заключается в заплывании

предварительно нанесенного поверхностного микро рельефа [10]. На поверхность исследуемых образцов InSb после финишной химико-динамической полировки наносилась сетка микроцарапин глубиной 0.04–0.06 мкм. Заплавление такого микро рельефа в нашем случае наблюдается при $E_{th} \approx 0.14$ Дж/см². Таким образом, можно сделать вывод, что изменение морфологии поверхности монокристаллов InSb при облучении с плотностью энергии импульсов $E \geq E_{th}$ (рис. 1) происходит вследствие плавления и диссоциации материала на стадии расплава.

На рис. 2 приведены спектры ФП исходного кристалла InSb (кривая 1) и образцов (кривые 2–5), облученных импульсами рубинового лазера с возрастающей дозой $D = E \cdot N$ (где N — количество импульсов) при допороговой плотности энергии импульса $E < E_{th}$. Максимумы спектров приведены к ~ 1 умножением на коэффициенты, указанные у каждой кривой 2–5. Кривые 2–5 на рис. 2, b получены путем нормирования спектральных зависимостей ФП облученных образцов (рис. 2, a, кривые 2–5) к исходному спектру (кривая 1). После облучения кристаллов InSb наблюдается рост сигнала ФП во всем спектральном диапазоне и особенно в коротковолновой области спектра (кривые 2–5). Наибольшее увеличение фоточувствительности образцов наблюдалось при дозе облучения $D = 0.7$ Дж/см² (кривая 5). Дальнейшее увеличение дозы облучения или облучение с плотностью энергии импульсов лазера $E \geq E_{th}$ приводит к снижению ФП монокристаллов InSb во всем диапазоне спектра фоточувствительности $h\nu = 0.2–1.24$ эВ.

Анализ формы спектров ФП кристаллов InSb и вида кривых релаксации сигнала ФП при возбуждении наносекундными импульсами лазера позволяет сделать вывод, что рост ФП в облученных образцах обусловлен уменьшением скорости поверхностной рекомбинации S (рис. 3, a) и увеличением времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) τ (рис. 3, b). Предполагается, что лазерная обработка поверхности InSb приводит к отжигу остаточных структурных несовершенств и вызывает уменьшение количества рекомбинационных центров в приповерхностном слое кристалла. На это указывает

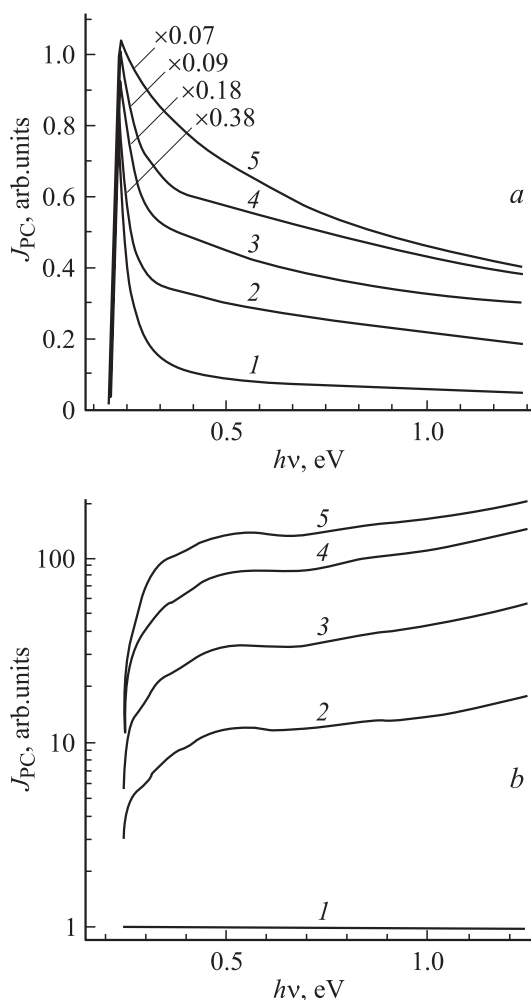


Рис. 2. Спектральные зависимости (a) и сравнительные спектры (b) фотопроводимости монокристаллов InSb до (кривая 1) и после облучения лазерными импульсами с дозой D , Дж/см²: 2 — 0.03, 3 — 0.22, 4 — 0.39, 5 — 0.70.

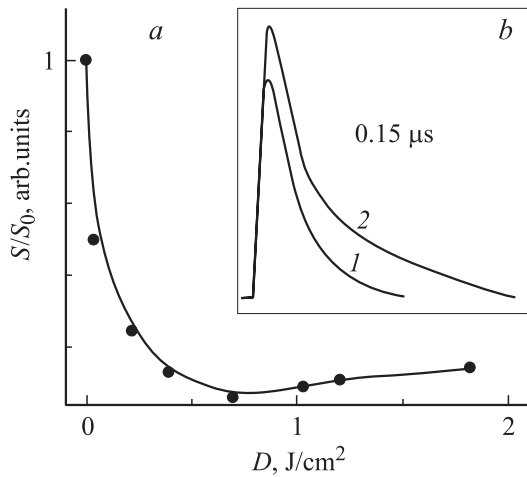


Рис. 3. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации S монокристаллов InSb от дозы облучения лазерными импульсами D (а) и кривые релаксации фотопроводимости (b) до (кривая 1) и после (кривая 2) облучения лазерными импульсами с дозой $D = 0.4$ Дж/см².

возрастание времени жизни ННЗ, а также увеличение вклада „медленной“ компоненты в общий характер релаксации фототока (рис. 3, b). Подобные эффекты могут быть также связаны с образованием приповерхностного инверсионного слоя, который препятствует движению фотоносителей к поверхности образца и, следовательно, замедляет рекомбинацию ННЗ на ней. Инверсионный слой при импульсном лазерном нагреве образцов до T_m образуется в результате „замораживания“ неравновесной высокотемпературной концентрации термофлуктуационных дефектов, которые в антимониде индия имеют акцепторные свойства [11]. Выявлено, что облучение кристаллов InSb приводило к росту их темнового сопротивления более чем на 10%, что может быть обусловлено увеличением толщины инверсионного слоя и его влиянием на общее сопротивление образцов.

Таким образом, установлено, что для монокристаллов InSb можно выбрать такой диапазон плотности энергии наносекундных импульсов рубинового лазера $E < E_{th}$, облучение в котором с определенной дозой D приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации и увеличению времени жизни ННЗ. При этом наблюдается значительный рост фоточувствительности облученных образцов. Эффект лазерного фотоочувствления кристаллов InSb может найти применение для оптимизации параметров рабочих элементов инфракрасных фотоприемников.

Список литературы

- [1] Л.Л. Федоренко, В.К. Малютенко, С.С. Болгов. Укр. физ. журн., **20**, 2041 (1975).
- [2] V.A. Gnatyuk. J. Phys. D: Appl. Phys., **32**, 2687 (1999).

- [3] Е.А. Горин, А.И. Бережная, Г.И. Янко. Поверхность. Физика, химия, механика, № **9**, 47 (1982).
- [4] П.К. Кашкаров, В.Ю. Тимошенко. Поверхность. Физика, химия, механика, № **6**, 5 (1995).
- [5] Р.В. Арутюнян, В.Ю. Баранов, Л.А. Большов, А.Ю. Сербант. *Воздействие лазерного излучения на материалы* (М., Наука, 1983).
- [6] M. Birnbaum, T.L. Stoker. J. Appl. Phys., **39**, 6032 (1968).
- [7] C.R. Meyer, M.R. Krueger, F.J. Bartoli. J. Appl. Phys., **51**, 5513 (1980).
- [8] Г.М. Гусаков, А.А. Комарницкий, А.С. Эм. Поверхность. Физика, химия, механика, № **6**, 86 (1991).
- [9] К.К. Джаманбалин, А.Г. Дмитриев, Э.Н. Сокол-Номоконов, Ю.И. Уханов. Физика и химия обраб. материалов, № **2**, 20 (1990).
- [10] В.Н. Абакумов, О.В. Зеленова, Ю.В. Ковальчук, Е.Л. Портной, В.Б. Смирницкий, И.А. Соколов. Письма ЖТФ, **8** (22), 1365 (1982).
- [11] В.В. Гаврушко, О.В. Косоогов. ФТП, **4**, 2373 (1970).

Редактор Л.В. Беляков

Effect of pulsing laser irradiation on morphology and photoelectric properties of InSb crystals

V.A. Gnatyuk*, O.S. Gorodnychenko

Kyiv National T. Shevchenko University,
01033 Kyiv, Ukraine

* Research Institute of Electronics,
Shizuoka University
432-8011 Hamamatsu, Japan

Abstract The effect of the nanosecond ruby laser pulses on morphology of the surface and photoelectric properties of InSb crystals was studied. It was established the existence of a value of the threshold energy density of 0.14 J/cm² at which melting of the crystal surface began. The modification of spectra and kinetics of the photoconductivity of samples after the irradiation were analyzed. It was found that irradiation of InSb with laser pulses of the energy density within a certain range resulted in decreasing the surface recombination rate and rising of the charge carrier lifetime, which consequently, led to increase in the photosensitivity of the crystals.