

## ВИНТОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТОКА $p$ -Ge(Au) ПРИ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ ОПТИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Н. С. Абакарова, К. М. Алиев, Х.-М. О. Ибрагимов

Институт физики им. Х. И. Амирханова Российской академии наук, Дагестанский научный центр, 367003, Махачкала, Россия

(Получено 9 апреля 1993 г. Принято к печати 1 ноября 1993 г.)

Винтовая неустойчивость в полупроводниках принадлежит к одному из наиболее изученных как в экспериментальном, так и в теоретическом плане видов неустойчивостей электронно-дырочной плазмы [1].

Абсолютную неустойчивость винтовых волн (режим генерации) впервые обнаружили Иванов и Рывкин [2] в образцах Ge, помещенных в достаточно сильное продольное магнитное поле. Результаты этих опытов были объяснены Гликсманом [3] на основе теории винтовой неустойчивости Кадомцева-Недоспасова [4], развитой для газовой плазмы.

Важное исследование этого явления на образцах Ge, InSb и Si провели Ларраби и Стил [5], которые доказали, что возникновение неустойчивости тока не связано с контактными явлениями и обусловлено наличием в объеме образца электронно-дырочной плазмы, создаваемой различными способами: освещением, инжекцией или нагревом образца.

В сообщении [6] приведены результаты теоретического исследования особенностей винтовой неустойчивости в электронно-дырочной плазме полупроводников, содержащих глубокие примесные уровни. Вместе с тем отметим, что среди большого количества трудов, посвященных изучению винтовой неустойчивости, нет работ по ее обнаружению в образцах полупроводников с глубоко лежащими уровнями. Дело в том, что критерий возбуждения винтовой неустойчивости (критерий абсолютной неустойчивости) соответствует условию  $\text{Im } \omega < 0$ , если в образце отсутствует амбиполярный снос квазинейтральных возмущений вдоль электрического поля. Такой снос возникает в заряженной плазме ( $n_0 \neq p_0$ , т. е. фоновые концентрации электронов и дырок не равны) или в условиях анизотропии подвижности носителей тока [1]. Для изотропной подвижности амбиполярный снос отличен от нуля только в заряженной плазме ( $n_0 \neq p_0$ ) и выражается известной формулой

$$\mu_a = \frac{\mu_e \mu_n (n - p)}{\mu_e n + \mu_n p},$$

где  $\mu_e$  и  $\mu_n$  — подвижности электронов и дырок соответственно, а  $n$  и  $p$  — концентрации электронов и дырок. Причем направление сноса соответствует направлению дрейфа неосновных носителей. В условиях амбиполярного сноса ( $\mu_a \neq 0$ ) порог возбуждения винтовой неустойчивости становится жестче: квадрат скорости дрейфового потока должен быть больше суммы квадратов скоростей сносов и амбиполярной диффузии

$$v_{dr}^2 > v_a^2 + v_s^2.$$

Отсюда следует, что в образцах с глубокими уровнями, где имеет место объемный заряд или заряженная плазма с большой разницей времен жизни носителей тока — электронов и дырок, возникает сильный амбиполярный снос и соответственно невозможность обнаружения винтовой неустойчивости. Если же использовать сильное «собственное» освещение совместно с двойной инжекцией с контактов, то при соответствующих электрических полях амбиполярный снос можно свести к минимуму и в продольных магнитных полях  $E \parallel H$  обнаружить винтовую неустойчивость. Большая чувствительность винтовой неустойчивости к амбиполярному сносу, как по порогу возбуждения, так и по частоте, может служить новым способом диагностики глубоко лежащих центров в полупроводниках. Безусловно, могут возникнуть некоторые экспериментальные трудности, связанные с идентификацией винтовой неустойчивости, так как в образцах с глубоко лежащими уровнями одновременно могут возникать неустойчивости рекомбинационного типа [7–10].

Далее, приведены экспериментальные результаты по исследованию винтовой неустойчивости в компенсированном  $p$ -Ge с золотом при высоких уровнях оптического возбуждения. Концентрация золота в исходном материале была  $N_{Au} = 10 \text{ см}^{-3}$ , удельное сопротивление  $\rho = 5 \cdot 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при  $T = 77 \text{ К}$ . Исследованные  $p^+ - p - n^+$ -структуры были изготовлены из исходного  $p$ -Ge(Au) в виде брусков размерами  $8 \times 1, 2 \times 1, 2 \text{ мм}^3$ , на противоположные концы которых после шлифовки и травления с CP-4 наносили контакты из индия с 0.5% галлия и олова с 7% сурьмы, инжектирующие дырки и электроны. После сплавления контактов образцы повторно травил в  $\text{H}_2\text{O}_2$  для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации. Кроме торцевых контактов, образцы снабжали поперечными парами холловских зондов для снятия амплитудно-частотных характеристик винтовой неустойчивости [1].

Для возбуждения плазмы оптическим методом использовали обычную (100 Вт) лампу накаливания или импульсную стробоскопическую лампу ИФК-120, запускаемую синхронно с импульсом электрического поля. Импульсный режим наложения электрического поля при высоких уровнях оптического возбуждения, когда сопротивление образца резко уменьшалось, исключал джоулев нагрев образца. Температуру образца контролировали двумя термодатчиками.

В зависимости от величины освещенности и электрического поля вольт-амперные характеристики  $p^+ - p - n^+$ -структур имеют либо сублинейный характер с колебаниями тока рекомбинационного типа на участке насыщения тока, либо  $S$ -образное переключение тока, либо суперлинейную зависимость  $I \sim V^m$  (где  $m \geq 2$ ), к которой приводит дальнейшее увеличение освещенности (рис. 1, а).

Неустойчивость тока в компенсированном  $p$ -Ge, возникающая на участке с положительным дифференциальным сопротивлением статической ВАХ, при неоднородном распределении неравновесных носителей достаточно хорошо изучена. Для ее объяснения привлекали теории рекомбинационных волн [7] скрытой отрицательной дифференциальной проводимости [8], а также теорию, развитую в работах [9, 10].

Нас же интересует случай после  $S$ -переключения или ВАХ с суперлинейной зависимостью тока от напряжения, когда в  $p^+ - p - n^+$ -структуре имеет место высокий уровень оптического возбуждения плазмы. Заметим, что экспериментально предельный уровень инжекции плазмы легче достигнуть при одинаковой освещенности в структурах, чем в образцах с омическими контактами.

Если теперь поместить  $p^+ - p - n^+$ -структуру с  $S$ -образной или суперлинейной ВАХ в продольное магнитное поле  $H \parallel E$ , то одновременно на нагревочном

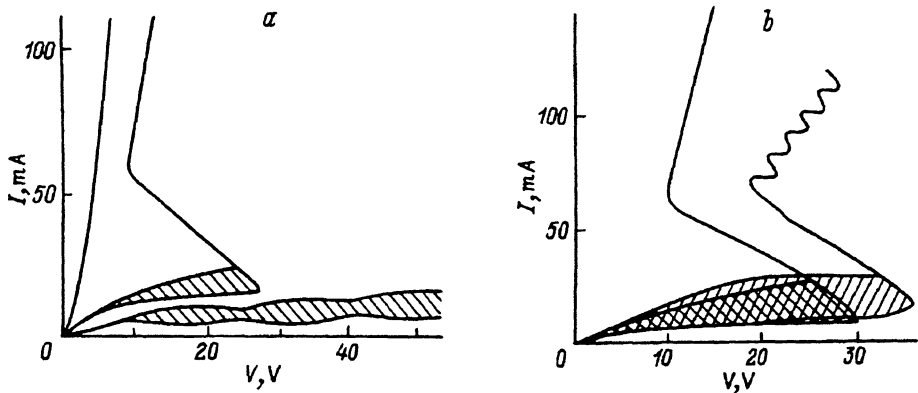


Рис. 1. ВАХ  $p^+ - p - n^+$ -структур:  $a$  — при освещении,  $b$  — в продольном магнитном поле.

сопротивлении  $R$ , последовательно связанном с образцом, и на холловских зондах возникают колебания напряжения, что характерно только для винтовой неустойчивости [ $1-3$ ]. На рис. 1,  $b$  приведены ВАХ для случая  $S$ -переключения при различных значениях магнитного поля  $H$ .

Необходимо отметить, что для винтовой неустойчивости характерно подавление колебаний в образце, если угол между  $E$  и  $H$  составит 10 и более градусов [ $1$ ]. Для исследованных нами структур это свойство проявляется, причем раствор угла между  $E$  и  $H$  более  $14^\circ$  приводит к полному подавлению неустойчивости.

Результаты измерения пороговой зависимости  $E_{th}(H_{th})$  приведены на рис. 2. На начальном участке пороговой кривой хорошо видна зависимость вида  $E \sim 1/H$ , что является отличительным признаком винтовой неустойчивости. Дальнейший рост магнитного поля приводит к характерному минимуму на пороговой кривой в области сильных магнитных полей [ $1$ ].

Таким образом, показано, что в образцах полупроводников с глубоко лежащими уровнями существует винтовая неустойчивость при высоких уровнях оптического возбуждения, когда за счет заполнения уровней или межзонных перебросов достигается условие квазинейтральности  $n_0 \approx p_0$ , и тем самым амбиполярный снос сводится к минимуму.

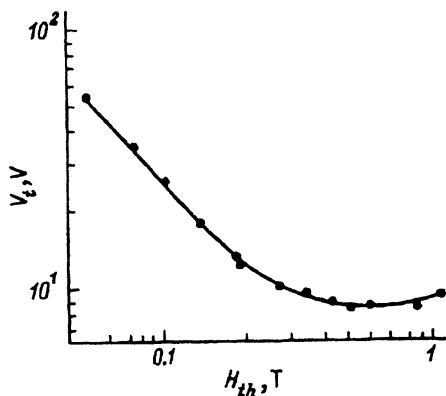


Рис. 2. Пороговая зависимость  $E_{th}(H_{th})$  для винтовой неустойчивости в  $Ge(Au)$  при  $T = 77$  К.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] В. В. Владимиров, А. Ф. Волков, Е. З. Мейлихов. Плазма полупроводников, 256. М. (1979).
- [2] Ю. Л. Иванов, С. Н. Рывкин. ЖТФ, 28, 774 (1959).
- [3] M. Gliksmán. Phys. Rev., 124, 1655 (1961).
- [4] В. В. Kadomsev, A. V. Nedospasov. J. Nucl. Energy G., 1, 230 (1961).
- [5] R. D. Larrabee, M. C. Steele. J. Appl. Phys., 31, 1519 (1960).
- [6] R. A. Muminov, A. Yu. Katulevski. Abstracts 8th Vilnius Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors. 43. Vilnius (1992).
- [7] О. В. Константинов, В. И. Перель, Г. В. Царенков. ФТТ, 9, 1761 (1968).
- [8] Н. И. Иглицын, Э. Г. Пель, П. Я. Первова, В. И. Фистуль. ФТТ, 8, 3696 (1966).
- [9] А. И. Бараненков, В. В. Осипов. ФТТ, 11, 720 (1969).
- [10] А. И. Бараненков, В. В. Осипов. ФТП, 3, 1656 (1969).

Редактор В. В. Чалдышев

---