

рода на несколько порядков меньше, чем для компонентов нержавеющей стали [8]. Отсюда можно сделать вывод о том, что основную роль в образовании коллекторной плазмы играют пары материала коллектора.

Следует отметить, что время появления тока в цепи «труба дрейфа—коллектор» определяется плотностью пучка электронов и скоростью диффузии плазмы поперек магнитного поля. Поэтому если длительность тока пучка не превышает время диффузии коллекторной плазмы до стенки трубы дрейфа, то наличие плазмы не оказывает влияния на результат измерений. Как показали измерения, в наших условиях (диаметр пучка 40 мм, диаметр трубы дрейфа 110 мм) задержка появления тока в цепи «труба дрейфа—коллектор» относительно возникновения плазмы составляет приблизительно 17 мкс.

Измерения коллектором в виде металлического цилиндра с подвижным дном (рис. 1) позволили оценить распределение плотности коллекторной плазмы вдоль оси пучка. В этом случае ток коллекторной плазмы, находящейся внутри цилиндра, замыкается через его стенку, а в цепи «коллектор—труба дрейфа» регистрируется только ток плазмы, находящейся вне (выше) цилиндра.

На рис. 3 приведены результаты измерений. Коллектор при измерениях оставался неподвижным, вдоль оси трубы дрейфа перемещался только цилиндр. Аппроксимируя зависимость тока в цепи «труба дрейфа—коллектор» от глубины коллектора линейной функцией, получим, что при глубине 100 мм ток на трубу дрейфа сокращается на 95 %. Из рис. 3 видно также, что при $X=25$ мм происходит резкое увеличение времени запаздывания тока на трубу дрейфа относительно времени появления тока на цилиндр. Возможно, это связано с тем, что при $X=25$ мм область наиболее плотной плазмы оказывается экранированной от трубы дрейфа. Использование в качестве датчиков тока омических шунтов несколько снижает величину плазменного тока, так как в этом случае между коллектором и трубой дрейфа возникает разность потенциала, уменьшающая выход заряженных частиц из плазмы.

Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы. Эффект «короткого замыкания» коллекторной плазмы может существенно исказить измерения тока $СИ$ заряженных частиц. Для исключения влияния тока распада коллекторной плазмы на измерения тока $СИ$ необходимо использовать в качестве коллектора материалы с низкой упругостью паров, конструкцию коллектора и электрическую схему измерительных цепей, исключающие регистрацию плазменных токов. Одним из возможных вариантов такой системы измерения тока $СИ$ является, по нашему мнению, цилиндр Фарадея с графитовой приемной частью высотой более 100 мм и с датчиком тока, включенным по схеме рис. 1.

Литература

- [1] Лазаренко А. В., Печерский О. П., Чебуков Е. С., Энгелько В. И. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпозиума по сильоточной электронике (1986, Новосибирск). Томск, 1986. Ч. III. 200 с.
- [2] Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Н. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 384 с.
- [3] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Поступило в Редакцию
13 ноября 1987 г.

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ И ЕГО ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ В СХЕМЕ ЛАЗЕРНОГО ПРОЕКЦИОННОГО МИКРОСКОПА

Д. Т. Алимов, А. М. Бакиев, В. А. Бобырев, М. Р. Брук,
В. А. Зимин, Л. А. Зимица, Б. С. Лукьянчук, Г. А. Шафеев

Оптические системы с усилителями яркости — лазерные проекционные микроскопы (ЛПМ) вызывают значительный интерес в связи с возможностью их практического применения в задачах воспроизведения и обработки оптической информации [1, 2]. Высокая раз-

решающая способность ЛПМ позволяет осуществлять запись оптической информации в малом объеме светочувствительной структуры с большой плотностью. Как было показано в [3, 4], ЛПМ может быть эффективно использован для решения задач лазерного воздействия на микрохимические процессы.

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментов по переносу и записи оптического изображения в схеме ЛПМ с целью формирования на поверхности образцов топологического микрорельефа, воспроизводящего рисунок фотошаблона.

Формирование микроизображения шаблона на поверхности образцов осуществлялось оптической системой, состоящей из двух каналов: визуального контроля и формирования изображения, действующих одновременно и независимо.

Отражающий фотошаблон представлял собой стеклянную пластину, поверхность которой была алюминирована в виде чередующихся металлизированных площадок размером

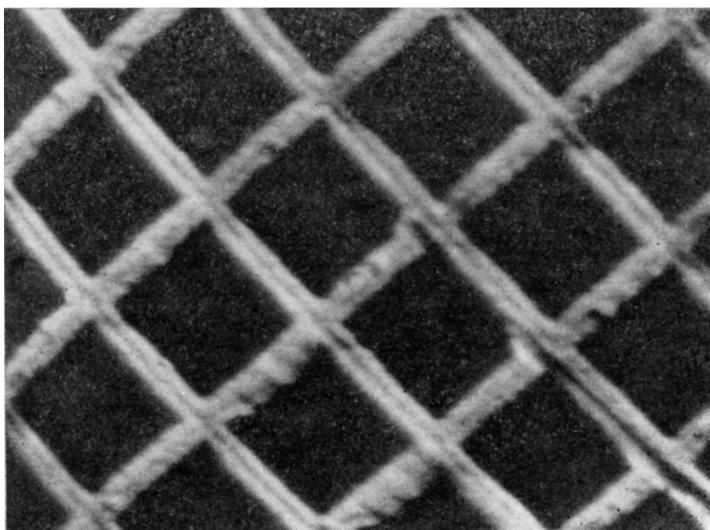


Рис. 1. Микрофотография рельефа в пленках Cu, толщина пленки 0.5 мкм, увеличение 9000 раз, ширина дорожки (светлые линии) 2 мкм.

3.0×3.0 мм и прозрачных окон. Коэффициент отражения света металлизированных областей составлял ~85 % на длине волны 0.51 мкм, а в окнах — ~4 %. Изображение фотошаблона по оптическому каналу формирования изображения проецировалось на образцы с пленочными покрытиями из In, Al, Cr, Cu, LaV₆ различной толщины, нанесенные на полированную поверхность кремния. Формирование микрорельефа на пленках исследуемых образцов в условиях эксперимента было вызвано тепловым воздействием лазерного излучения, что приводило к локальному испарению вещества пленки. Для оценки средней мощности излучения, падавшего на отдельный участок объекта, был проведен следующий контрольный эксперимент. На фотошаблоне с помощью непрозрачной маски выделялась одна металлизированная площадка, а в качестве объекта вместо кремниевых помещались стеклянные пластины с различными отражающими покрытиями. Таким путем создавался самостоятельный оптический резонатор, в канале которого осуществлялась генерация лазерного излучения. Измеренная средняя мощность составляла величину ≈ 1 мВт. Необходимо отметить, что значение средней мощности в пучке слабо зависело от коэффициента отражения стеклянных пластин, установленных вблизи фокальной плоскости микрообъектива, хотя коэффициент отражения варьировался от 60 до 80 %. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в условиях проводимых экспериментов активная среда работает в режиме значительного насыщения [2].

На рис. 1 приведены микрофотографии поверхностного рельефа, сформированного в пленках Cu. Микрофотографии были получены с помощью электронного микроскопа. Минимальный размер дорожек составлял 2—3 мкм. Дифракционные искажения, связанные с использованием микрообъектива, судя по приведенным результатам, можно считать не-

значительными. Время экспонирования объектов было одинаковым и составляло 2—3 с. Оно определялось отсчетом времени до четкого проявления изображения экспонируемого участка объекта на экране. Фотоснимок с экрана, соответствующий окончанию экспони-

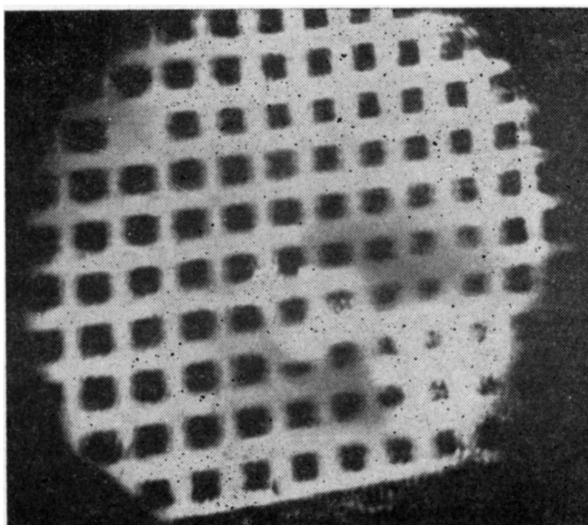


Рис. 2. Изображение экспонируемого объекта с экрана ЛПМ. Увеличение 2000 раз.

рования, приведен на рис. 2. Из сопоставления рис. 1, 2 можно видеть, что визуальный контроль обеспечивает выбор правильной экспозиции лазерного воздействия на образец. Необходимо отметить, что для данной оптической схемы имеет место специфичный источник

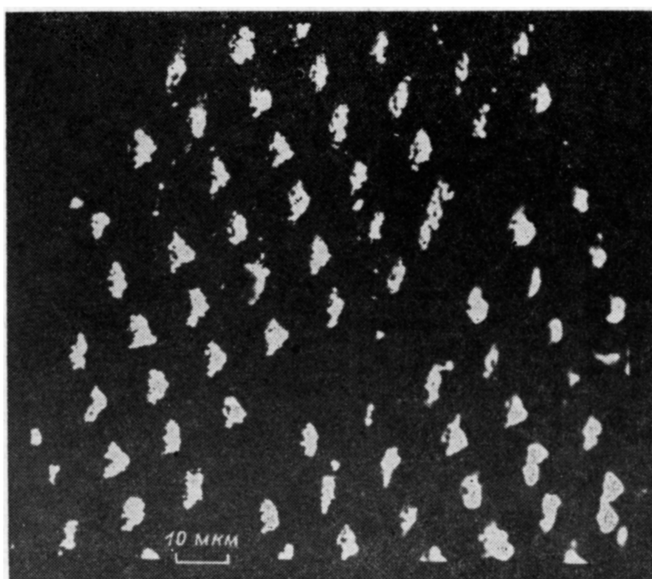


Рис. 3.

искажения оптической информации, связанный со взаимодействием между отдельными световыми пучками, распространяющимися в нелинейной активной среде. Пучок, отраженный от каждого элемента шаблона, усиливается всей активной средой усилителя. Это приводит к конкуренции усиливающихся пучков, в результате которой детали шаблона, имеющие

небольшой размер, не изображаются на объект. Избежать этого удается, применяя две и более экспозиции с шаблонами, содержащими детали примерно одинакового размера.

Эксперименты, проведенные с более толстыми пленками в аналогичных условиях показали, что с увеличением толщины ($d \sim 2-3$ мкм) происходят неконтролируемые нарушения поверхности: искажения формы и размеров элементов, неровности краев и неоднородности обработки. При слабой адгезии к подложке нанесенных слоев в ряде случаев наблюдается также отслаивание пленок.

Описанная схема была использована также для осаждения металлов на полупроводники как из растворов электролитов [3, 4], так и из металлоорганических соединений [5]. На рис. 3 представлен вид осадка Au на n -GaAs из водного раствора $\text{KAu}(\text{CN})_2$ за одну экспозицию (20 кВ).

Таким образом, реализованная в экспериментах схема ЛПМ позволяет осуществить запись оптической информации на различные объекты с достаточно большим разрешением. Можно надеяться, что подобные установки также найдут применение не только для визуального контроля изделий микроэлектроники [6, 7], но и в активных процессах безмасочной лазерной обработки материалов, лазерной литографии и других лазерно-стимулированных термо- и фотопроцессах.

Литература

- [1] Петраш Г. Г. // Вестн. АН СССР. 1982. № 2. С. 66—75.
- [2] Земсков К. И., Исаев А. А., Казарян М. А., Петраш Г. Г. // Квантовая электрон. 1976. Т. 3. № 1. С. 35—43.
- [3] Bunkin V. F., Garonov S. V., Lukyanchuk B. S., Shafeev G. A. // Proc. V Intern. Conf. on Luminescence. Szeged, Hungary, 1985. P. 129.
- [4] Брук М. Р., Бункин Ф. В., Казаров Ю. Е., Шафеев Г. А. Препринт ИОФАН. № 286. М., 1987.
- [5] Бункин Ф. В., Грандберг К. И., Лукьянчук Б. С. и др. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 7. С. 1321—1322.
- [6] Беляев В. П., Бурмакин В. А., Былкин В. И. и др. // Электрон. промышленность. 1976. Вып. 5 (53). С. 39—40.
- [7] Блинов И. Г., Валиев К. А., Петраш Г. Г. и др. // Электрон. промышленность. 1976. Вып. 3. С. 28.

Специализированное конструкторское бюро
с опытным производством
АН УзССР
Отдел теплофизики

Поступило в Редакцию
12 февраля 1988 г.

К НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСИЛИТЕЛЯ

М. В. Кузелев, В. А. Панин, А. П. Плотников

В существующих на сегодняшний день теоретических работах по нелинейной теории усиления в плазменном волноводе рассматривается взаимодействие монохроматической волны с сильноточным электронным пучком [1-4]. Поскольку усилитель должен по возможности усиливать достаточно широкополосный сигнал, то задача о многомодовом усилении волн сильноточным релятивистским электронным пучком в плазменном волноводе представляет несомненный интерес. Следует, однако, отметить, что вопрос об усилении широкополосных сигналов для слаборелятивистских, а следовательно, слаботочных пучково-плазменных систем рассматривался в работах [8-10].

Хорошо известно, что резонансная частота возбуждаемой пучком волны в плазменном волноводе, помещенном в бесконечно сильное продольное магнитное поле, определяется формулой [5]

$$\omega = \omega_p \sqrt{1 - \alpha^2}, \quad \alpha = \frac{k_{\perp} u \gamma}{\omega_p}, \quad (1)$$