

$$J_0 = \int_{-k\pi/N}^{k\pi/N} \frac{\sin^2 Nz}{z^2} dz = \pi N \alpha(k),$$

где $\alpha(k) = J_0(k)/J_0(\infty)$. Для получения верхней оценки γ_N выберем $k=1$. Результаты численных расчетов при $k=1$ дают $\alpha=0,9$.

Подставляя значения J и I_0 в выражение для γ_N , получим искомую формулу

$$\gamma_N = 0,37k/N^2 \cdot 100\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Гибин, А. Г. Козачок, Е. С. Нежевенко, Ю. Н. Солодкин, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Анализ спектров одномерных сигналов оптическими методами.— *Автометрия*, 1971, № 1.
2. F. Lanzl, H. J. Mager and W. Waidelich. Coherent Optical Analog Computer for the Evaluation of Interferogram.— *J. Opt. Soc. 9m.*, 1971, v. 61, N 10.
3. E. V. Felstead. Optical Fourier Transformation of Area — Modulated Spatial Functions.— *Appl. Opt.*, 1971, v. 10, N 11.
4. А. А. Дяченко, М. В. Персиков, О. Е. Шущпанов. Применение теневых графиков для спектрального анализа функций методами когерентной оптики.— *Оптика и спектроскопия*, 1971, т. 31, вып. 3.
5. Ю. В. Чугуй. Оптическая обработка сигналов с помощью силуэтных фильтров.— *Автометрия*, 1972, № 5.
6. В. А. Бургов. Основы записи и воспроизведения звука. М., «Искусство», 1954.
7. B. J. Pernick, S. Levinson, C. Bartolotta. Enhancement of Low Spatial Frequency Signals with Optical Aperture Tapering.— *Appl. Opt.*, 1970, v. 9, N 8.
8. Carlton E. Thomas. Optical Spectrum Analysis of Large Space Bandwidth Signals.— *Appl. Opt.*, 1965, v. 5, N 11.
9. М. Бори, Э. Вольф. Основы оптики. М., «Наука», 1970.
10. С. Т. Васьков, В. К. Зайцев, Г. М. Мамонтов, А. К. Поташников, С. Е. Ткач. Устройство вывода информации из ЭВМ на микрофильм.— В кн.: Средства ввода в ЭВМ и отображения графической информации. Новосибирск, 1974.

Поступила в редакцию 22 мая 1974 г.

УДК 681.327

**В. В. КОРСАКОВ, В. И. НАЛИВАЙКО, В. Г. РЕМЕСНИК,
В. Г. ЦУКЕРМАН**
(Новосибирск)

РЕВЕРСИВНАЯ ЗАПИСЬ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ЛАЗЕРНЫМ И ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧАМИ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СТЕКЛООБРАЗНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Развитие методов оптической обработки информации стимулировало широкий поиск новых регистрирующих сред. Перспективными в этом направлении можно считать халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП), которые обладают рядом достоинств по сравнению с уже известными фоточувствительными материалами. К этим достоинствам прежде всего следует отнести чрезвычайно высокое разрешение ХСП и возможность записи информации в «реальном масштабе времени» [1—3]. Большой интерес представляет вопрос стирания и многогранной регистрации информации в ХСП, открывающий возможность их использования в качестве оперативных запоминающих сред.

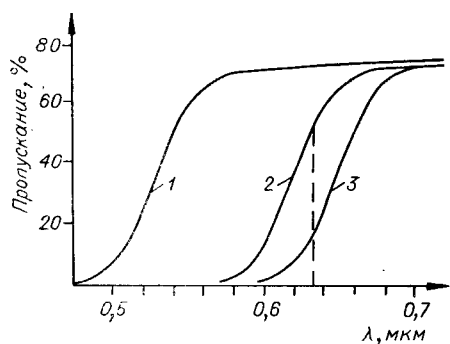


Рис. 1. Типичные спектральные характеристики пропускания напыленных ХСП пленок:
1 — As_2S_3 ; 2 — $\text{As}_2\text{S}_3 \times \text{As}_2\text{Se}_3$; 3 — As_2Se_3 . Толщина пленок ~ 15 мкм.

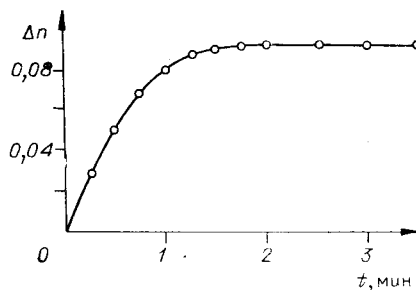


Рис. 2. Зависимость изменения показателя преломления (Δn) от времени экспонирования пленки $\text{As}_2\text{S}_3 \times \text{As}_2\text{Se}_3$ при экспонировании лучом гелий-неонового лазера интенсивностью $6,5$ мВт/мм².

Настоящая работа представляет обзор полученных нами результатов по записи и стиранию оптической информации различными источниками излучения в пленках ХСП.

Пленки на основе сульфидов и селенидов мышьяка (As_2S_3 , As_2Se_3 , $\text{As}_2\text{S}_3 \times \text{As}_2\text{Se}_3$) готовились термическим или электронно-лучевым испарением в вакууме и имели толщину 1—20 мкм. В этих пленках производилось исследование особенностей изменений оптических параметров ХСП в процессах записи и различных режимах стирания записанной информации.

Реверсивная запись голограмм. Для записи голограмм использовались аргоновый ($\lambda = 5145 \text{ \AA}$) или гелий-неоновый ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$) лазер. Восстановление голограмм осуществлялось с помощью гелий-неонового лазера. Выбор наиболее подходящего материала для записи лучом лазера того или иного типа определялся спектральной характеристикой пропускания полученной пленки (рис. 1). Для обеспечения эффективной записи фазовой голограммы во всем объеме регистрирующей среды желательно выполнение условия равномерного поглощения записывающего излучения. Кроме того, при восстановлении голограмм для получения наибольшей дифракционной эффективности необходимо малое поглощение излучения в материале. Выполнение этих условий в нашем случае реализуется выбором рабочей точки в области края собственного поглощения при вариации состава пленки, позволяющей смещать этот край в широкой области видимого спектра. Так, для пленки состава $\text{As}_2\text{S}_3 \times \text{As}_2\text{Se}_3$ (кривая 2 на рис. 1) рабочая точка соответствует длине волны излучения гелий-неонового лазера (пунктирная линия). При этом дифракционная эффективность решетки при записи и восстановлении этим лазером достигла 25%. Еще более высокое значение дифракционной эффективности получено при записи дифракционной решетки с помощью аргонового лазера в слое сульфида мышьяка. В случае когда угол падения восстанавливающего луча гелий-неонового лазера соответствовал углу Брэгга, величина дифракционной эффективности достигала 80%.

Полученные высокие значения дифракционной эффективности указывают на преобладание явления фазовой модуляции. Действительно, при экспонировании пленок наблюдается значительное изменение показателя преломления (рис. 2), что обеспечивает получение высокой дифракционной эффективности записанных голограмм.

Записанные голограммы можно стирать нагреванием пленки до температуры, близкой к температуре размягчения материала. При этом

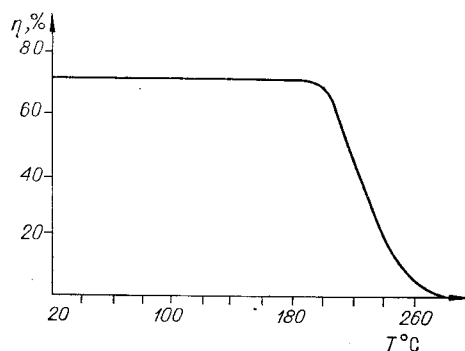


Рис. 3. Зависимость величины дифракционной эффективности решетки (η), записанной в пленке As_2S_3 , от температуры. Толщина пленки 12 мкм. Скорость нагревания пленки 10°C в мин.

циклы записи и стирания голограмм на исследуемых материалах не приводили к уменьшению величины дифракционной эффективности [4].

Для выяснения причин этого явления нами было проведено исследование температурной зависимости показателя преломления пленок. Использовалась методика измерения сдвига интерференционных максимумов на кривых пропускания пленок в области малого поглощения при изменении показателя преломления [5].

Оказалось, что для напыленной пленки, не подвергавшейся отжигу, кривая зависимости изменения показателя от температуры имеет два отчетливо наблюдаемых участка с различным наклоном (кривая 1 на рис. 4). При экспонировании такой пленки начальное значение показателя преломления увеличивается, однако характер температурной зависимости показателя преломления остается прежним (кривая 2).

Если же напыленную пленку подвергнуть отжигу, что имеет место в процессе стирания, то начальное значение показателя преломления резко возрастет. На рис. 4 пунктирная линия показывает изменение показателя преломления предварительно нагретой пленки при охлаждении. Видно, что повторное экспонирование приводит к значительно меньшему изменению величины показателя преломления, а ее температурная зависимость (кривая 3) линейно возрастает и не имеет характерных для кривых 1 и 2 изломов.

Таким образом, уменьшение чувствительности исследованных пленок при многократной записи голограмм связано с необратимыми изменениями структуры напыленных пленок при их отжиге. Как оказалось, эти изменения имеют место при нагревании напыленной пленки выше температуры $100\text{--}120^\circ\text{C}$ (см. рис. 4), что соответствует характерным участкам изгиба кривых 1 и 2. По-видимому, наблюдаемые нами изменения показателя преломления, так же как и изменения электрических свойств подобных соединений [6], обуслов-

в качестве подложек использовались кристаллы CaF_2 и BaF_2 , имеющие коэффициенты линейного расширения, близкие к напыленным пленкам. Это предотвращало растрескивание пленок при нагревании и охлаждении во время термического стирания. На рис. 3 показано, что уменьшение дифракционной эффективности, обусловленное процессом стирания решетки, начинается при температуре пленки $180\text{--}200^\circ\text{C}$. При повторной записи дифракционная эффективность решеток, записанных при тех же условиях, оказалось на порядок ниже.

В дальнейшем многократные

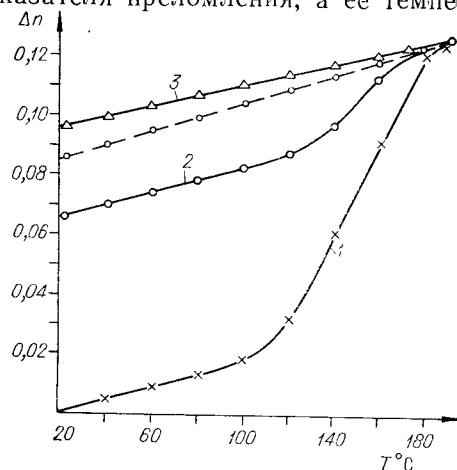


Рис. 4. Зависимость изменения показателя преломления пленки As_2S_3 при нагревании и охлаждении со скоростью 1°C в мин:

1 — неэкспонированная пленка после напыления; 2 — экспонированная пленка до отжига; 3 — экспонированная пленка после отжига.

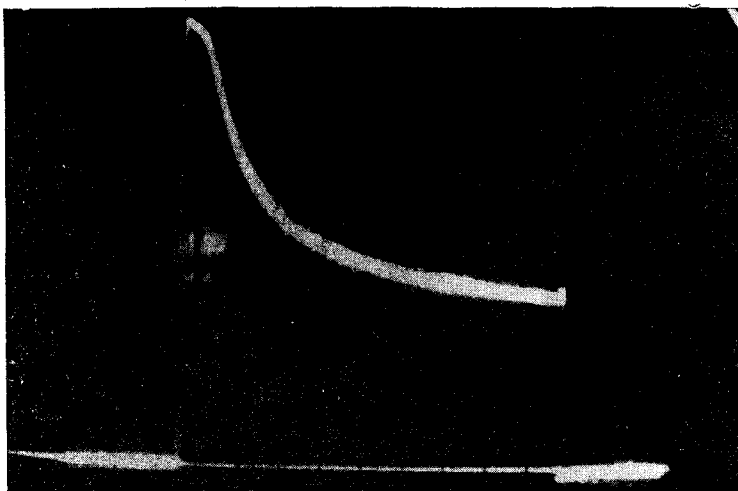


Рис. 5. Осциллограмма тока фотодиода, характеризующая изменения пропускания пленки в процессе экспонирования светом.

лены перестройкой «молекулярной» структуры пленки, соответствующей индивидуальному прибытию молекул на подложку при напылении, в более упорядоченную структуру исходного стеклообразного материала в отожженной пленке. Поэтому, чтобы процесс стирания не приводил к резкому снижению дифракционной эффективности повторно записанных голограмм, нагрев и охлаждение образца должны проводиться в сочетании с каким-либо воздействием, препятствующим упорядочению структуры материала.

Следует отметить, что в более толстых пластинах, полученных механической обработкой исходного стеклообразного материала, синтезированного в режиме медленного охлаждения, можно реверсивно записывать голограммы без существенного изменения оптических свойств пластины после первого цикла стирания. Правда, изменение показателя преломления при экспонировании в этом случае меньше, чем в напыленных пленках, однако использование большей толщины материала позволяет получать высокоэффективные объемные голограммы.

Запись и стирание битовой информации лучом лазера. Для реверсивной записи оптической информации источником излучения служил He—Ne лазер. Модуляция света осуществлялась механическим затвором, который позволял получать длительности световых импульсов от 1 мс и более. Интенсивность падающего излучения регулировалась оптическим фильтром с переменным пропусканием.

Короткофокусным объективом луч лазера фокусировался в пятно с диаметром менее 10 мкм. Изменение пропускания в процессе записи и стирания фиксировалось фотодиодом и наблюдалось визуально с помощью микроскопа. На рис. 5 приведена осциллограмма изменения тока фотодиода при освещении пленки в течение нескольких секунд лучом лазера интенсивностью 0,2 Вт/мм². Как видно из рисунка, через несколько секунд после начала освещения процесс потемнения достигает насыщения, после чего пропускание материала практически не изменяется.

Нами обнаружено, что с увеличением интенсивности экспонирующего света для изменения пропускания перестает выполняться закон взаимозаменяемости между интенсивностью и временем облучения. Он соблюдается при преимущественно световом взаимодействии излучения с материалом, когда преобладают фотохимические процессы с предполагаемыми разрывами химических связей, а нагревание образца во

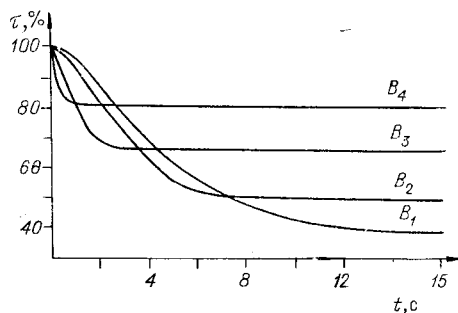


Рис. 6. Зависимость пропускания (τ) слоя As_2Se_3 толщиной 1,5 мкм от времени освещения лучом гелий-неонового лазера различной интенсивности (B):
 $B_1=0,15$ Вт/мм²; $B_2=0,4$ Вт/мм²; $B_3=1,2$ Вт/мм²; $B_4=6$ Вт/мм².

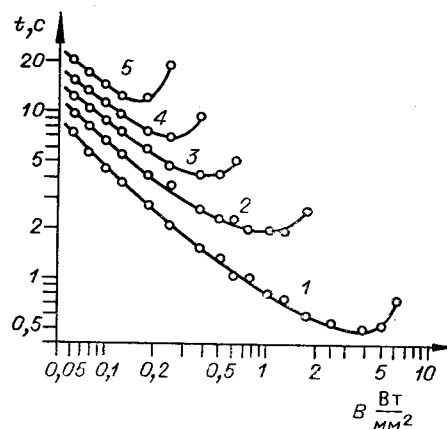


Рис. 7. Семейство кривых, определяющих необходимое время воздействия (t) и интенсивность (B) луча для получения необходимой глубины модуляции ($\Delta\tau$):
 личных плотностях тока электронов:
 1 — $\Delta\tau=20\%$; 2 — $\Delta\tau=30\%$; 3 — $\Delta\tau=40\%$; 4 — $\Delta\tau=50\%$; 5 — $\Delta\tau=60\%$.

время облучения незначительное. Однако в случае достаточно мощного излучения происходит одновременно и локальный нагрев облучаемого участка, приводящий к частичному восстановлению исходной структуры материала. В результате в области больших мощностей излучения увеличение интенсивности приводит к уменьшению степени почернения пленки. На рис. 6 показано изменение пропускания пленки во времени при освещении лучом лазера различной интенсивности. Начальное пропускание нами условно принято за 100%. Анализируя рис. 6, можно сделать вывод о возможности записи и стирания информации одним лучом лазера различной интенсивности. При этом с целью уменьшения времени записи ее целесообразно производить лучом большей интенсивности, а стирание, как более длительный процесс, — лучом меньшей интенсивности. Таким образом, процесс стирания будет сопровождаться потемнением пленки (уменьшением пропускания), а процесс записи — просветлением.

Наличие двух процессов, происходящих в материале при световом и тепловом воздействиях на него, обуславливает существование оптимальных режимов записи и стирания.

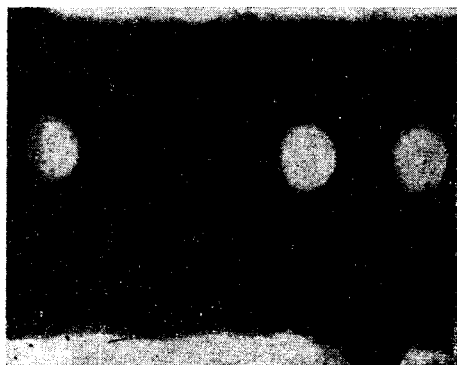


Рис. 8. Микрофотография участка пленки (увеличение $\times 1000$), иллюстрирующая запись и стирание битовой информации лучом лазера.

Для изучения этого вопроса нами были оценены величины интенсивности излучения (B) и длительности экспозиции (t), необходимые для получения некоторой глубины модуляции, определяющей контраст записанной точки (рис. 7). Под глубиной модуляции ($\Delta\tau$) мы понимаем изменение пропускания пленки в процентах от начального значения. Из кривых на рис. 7 видно существование оптимальных режимов (с точки зрения минимального времени стирания) для данного контраста. Поэтому в каждом конкретном случае, когда предъявляются требования к увеличению глубины модуляции либо к умень-

шению времени стирания, нужно выбирать определенную мощность излучения.

Кривые на рис. 7, характеризующие условия процесса стирания, получены экспериментально на пленках состава As_2Se_3 толщиной 2 мкм. Что касается процесса записи, то он может происходить за гораздо более короткое время (менее 1 мс).

В качестве примера, показывающего возможность реверсивной импульсной записи, на рис. 8 приведена микрофотография участка пленки с записанной битовой информацией. Широкое темное поле на фотографии получено при освещении пленки излучением He—Ne лазера малой интенсивности ($B=0,1$ Вт/мм²) в течение 5—10 с. Затем на этой площади короткими импульсами ($t=1$ мс) большей интенсивности ($B=10$ Вт/мм²) были записаны четыре светлые точки диаметром 10 мкм. Одна из точек (вторая слева) была стерта лучом того же лазера за 5 с при освещении $B=0,1$ Вт/мм². После 50 циклов записи и стирания точки на пленке не было замечено каких-либо необратимых изменений.

Как оказалось, исследуемые нами пленки не имеют порога по чувствительности, т. е. постепенно темнеют как при дневном освещении, так и при многократном освещении короткими импульсами малой интенсивности. Так, при импульсном считывании записанного на пленке As_2Se_3 светового пятна лучом He—Ne лазера интенсивностью 5 мВт/мм² и длительностью 100 мкс относительное пропускание светлого пятна уменьшается примерно на 1% после 10^4 циклов считывания.

Запись и стирание оптической информации электронным лучом. При изучении вопроса реверсивной записи оптической информации электронным пучком использовались ХСП пленки, нанесенные на полупрозрачные подложки с проводящими электродами из двуокиси олова. Толщина пленок ($d=0,5-3$ мкм) выбиралась из расчета оптимального поглощения электронов с энергиями 5—30 кэВ [7].

Исследование действия быстрых электронов на оптические свойства пленок проводилось на измерительной установке (рис. 9). Образец помещался в вакуумный объем. Конструкция разборной электронной пушки с помощью блока питания обеспечивала возможность управлять электронным пучком, варьируя плотность тока, энергию электронов, а также длительность импульса. Оптическая схема, состоящая из источника света, линз, сменных фильтров и фотоприемника, позволяла контролировать изменения оптического пропускания образца в процессе его облучения электронами. Электрический сигнал фотоприемника регистрировался с помощью осциллографа или самописца.

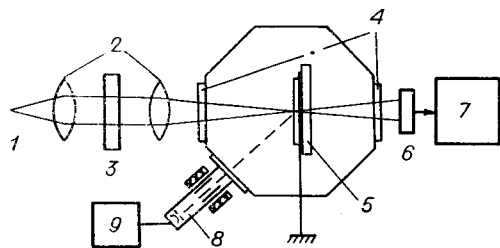


Рис. 9. Схема установки для исследования воздействия электронного облучения на оптические параметры ХСП пленок:

1 — источник света; 2 — коллимирующая и фокусирующая линзы; 3 — узкополосный фильтр; 4 — прозрачные для света окна вакуумного объема; 5 — подложка с проводящим покрытием и слоем ХСП материала; 6 — фотоприемник; 7 — регистрирующий прибор; 8 — разборная электронно-лучевая пушка; 9 — блок питания электронной пушки.

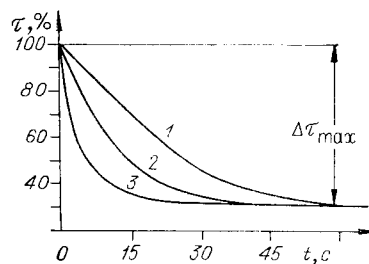


Рис. 10. Зависимость пропускания света ($\lambda=4980$ Å) пленкой As_2S_3 от времени ее облучения электронами с энергией 20 кэВ при различных плотностях тока электронного пучка (I):

1 — $I=0,5 \times 10^{-6}$ А/мм²; 2 — $I=1 \times 10^{-6}$ А/мм²; 3 — $I=2 \times 10^{-6}$ А/мм². Толщина пленки 2 мкм.

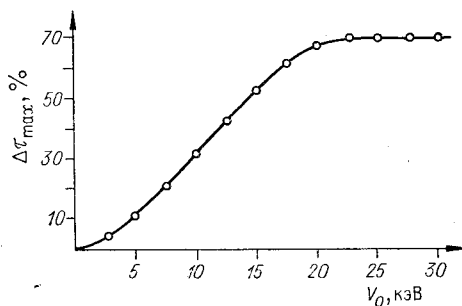


Рис. 11. Зависимость глубины модуляции ($\Delta\tau_{\text{max}}$) на длине волны света $\lambda=5000 \text{ \AA}$ для слоя As_2S_3 от энергии бомбардирующих электронов. Плотность тока электронного пучка $I=0,25 \times 10^{-6} \text{ А/мм}^2$.

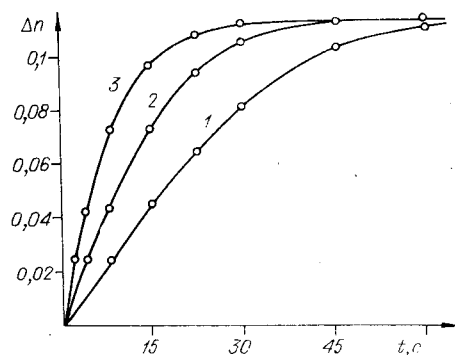


Рис. 12. Зависимость изменения показателя преломления (Δn) пленки As_2S_3 от времени облучения электронами энергии 20 кэВ. Толщина пленки 2 мкм. Плотность тока электронного пучка:
 1 — $I=0,5 \cdot 10^{-6} \text{ А/мм}^2$; 2 — $I=1 \cdot 10^{-6} \text{ А/мм}^2$;
 3 — $I=2 \cdot 10^{-6} \text{ А/мм}^2$.

Как и при световом воздействии, электронный пучок вызывал потемнение пленки, обусловленное сдвигом края собственного поглощения в длинноволновую область спектра. При этом также наблюдалось значительное увеличение показателя преломления. В отличие от записи световым лучом, где необходимо, чтобы длина волны излучения соответствовала краю собственного поглощения, запись электронным лучом можно производить для всех пленок ХСП вне зависимости от положения края. Глубина проникновения электронов определяется плотностью вещества и соответствует для этих материалов примерно 2 мкм при ускоряющем напряжении 20 кВ [7]. На рис. 10 показана типичная зависимость изменения относительного пропускания света (τ) одной из пленок в процессе ее облучения пучком электронов. Пропускание образца измерялось в области края собственного поглощения на длине волны λ_0 , соответствующей коэффициенту пропускания 30% для неэкспонированной пленки. Как видно из рисунка, форма кривых изменения относительного пропускания во времени зависит от плотности тока электронного пучка. При постоянном ускоряющем напряжении все кривые имеют насыщение при $\Delta\tau_{\text{max}}$. Зависимость $\Delta\tau_{\text{max}}$ от энергии электронов для одной из пленок толщиной 2 мкм приведена на рис. 11. В области малых значений ускоряющего поля энергия электронов недостаточна для их проникновения на всю глубину слоя. Поэтому темнеет лишь поверхностный участок пленки, что и определяет сравнительно небольшую величину изменения пропускания. При энергиях электронов, превышающих 20 кэВ, происходит поглощение электронов по всей глубине слоя и пропускание пленки с дальнейшим увеличением ускоряющего потенциала не меняется.

Зависимость изменения показателя преломления (Δn) от времени при различных токах электронного пучка приведена на рис. 12. Видно, что форма этих кривых соответствует изменению пропускания от времени (см. рис. 10). Величина Δn достигает 5% (показатель преломления исследовавшихся пленок ХСП $n \approx 2,5 \div 3$).

Записанную электронным лучом информацию можно стереть нагревом пленок до температуры $\sim 200^\circ \text{C}$. Повторная запись приводит к меньшим величинам $\Delta\tau$ и Δn (как обсуждалось выше, происходит отжиг напыленной пленки). Последующие циклы стирания — записи дают постоянные величины $\Delta\tau \sim 50\%$ и $\Delta n \sim 0,5\%$.

Стирание можно также осуществлять электронным лучом, увеличив соответственно его мощность, чтобы происходил разогрев облучае-

мого участка пленки до температуры стирания ($\sim 200^\circ \text{C}$). В наших экспериментах стирание (т. е. просветление) осуществлялось электронным пучком диаметром 0,3 мм при токе пучка $I=3 \cdot 10^{-5} \text{A}$, при ускоряющем напряжении 20 кВ и времени экспонирования $t=10 \text{ мс}$.

Выводы

Напыленные пленки ХСП отличаются от известных регистрирующих сред большой величиной изменения показателя преломления ($\Delta n > 0,1$). Для получения высоких значений дифракционной эффективности голограмм вариаций компонентов ХСП можно удовлетворять оптимальным условиям записи и считывания лучом лазера той или другой длины волны.

Первое термическое стирание записанной информации приводит к уменьшению дифракционной эффективности повторно записанных голограмм вследствие уменьшения диапазона изменения показателя преломления. Последующие циклы записи—стирания не приводят к заметному уменьшению величины дифракционной эффективности голограмм.

Воздействие быстрыми электронами на ХСП приводит к аналогичным изменениям показателя преломления и коэффициента пропускания, что и при лазерном облучении.

Осуществлена импульсная реверсивная запись битовой информации лазерным и электронным лучами в пленках ХСП.

Показана возможность смешанного воздействия лазерного и электронного лучей на ХСП. Например, стирание информации можно проводить светом, а запись битовой информации—электронным лучом.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. G. Brandes, F. P. Laming, A. D. Pearson. Optically Formed Dielectric Gratings in Thick Films of Arsenic-Sulfur Glass.— *Appl. Opt.*, 1970, v. 9, N 7.
2. S. A. Keneman. Hologram Storage in Arsenic Trisulfide Thin Films.— *Appl. Phys. Lett.*, 1971, v. 19, N 6.
3. T. Igo, Y. Toyoshima. Optically Induced Reversible Change in Amorphous Semiconductors.— *Jap. J. Appl. Phys.*, 1972, v. 11, N 1.
4. В. В. Корсаков, В. И. Наливайко, В. Г. Ремесник, В. Г. Цукерман. Особенности многократной записи и стирания оптической информации в некоторых халькогенидных стеклообразных полупроводниках.— *ЖТФ*, 1974, № 4.
5. О. С. Хевенс. Измерение оптических констант тонких пленок.— В кн.: *Физика тонких пленок*. Т. 2, М. «Мир», 1967.
6. D. G. Ast. Structural and Electrical Properties of Evaporated—Amorphous and Vitreous—Amorphous V—VI Compounds.— *J. Vac. Science Techn.*, 1973, v. 10, N 5.
7. E. J. Kobetich, R. Katz. Energy Deposition by Electron Beams and δ Rays.— *Phys. Rev.*, 1968, v. 170, N 2.

Поступила в редакцию 27 марта 1974 г.