Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 73 (1982)

Heft: 17

Artikel: Leistungsfähige Signalverarbeitung mit Hilfe von SAW-Baulelementen

Autor: Nyffeler, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904999

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

BULLETIN des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik und Elektronik
Electrotechnique et électronique

STEN 1982: Neue Entwicklungen in der hochfrequenten Übertragungstechnik

Développements récents en technique de transmission à haute fréquence

Leistungsfähige Signalverarbeitung mit Hilfe von SAW-Bauelementen

F. Nyffeler

621.391:621.3.029.5;

Auf der Basis von akustischen Oberflächenwellen (SAW: Surface Acoustic Waves) lassen sich Bauelemente realisieren, die sich durch eine grosse Signalverarbeitungskapazität und eine miniaturisierte, robuste Bauweise auszeichnen. Ausgehend von den Grundlagen der SAW-Technik wird die Wirkungsweise verschiedener SAW-Bauelemente erläutert. Durch die Ausnützung von nichtlinearen Effekten und mittels akustoelektrischen Kombinationselementen ist es in letzter Zeit im Labor gelungen, das Anwendungsspektrum von akustischen Oberflächenwellen zu erweitern. Abschliessend wird auf jüngste Forschungsarbeiten auf dem Gebiet akusto-optischer Bauelemente hingewiesen.

Grâce aux ondes acoustiques de surface, on peut concevoir des composants qui se distinguent par une grande capacité de traitement des signaux, tout en étant d'une robuste construction miniaturisée. Leur fonctionnement est expliqué. En laboratoire, la gamme des emplois des ondes acoustiques de surface a pu être récemment étendue par l'utilisation d'effets non-linéaires et au moyen d'éléments combinatoires audio-électriques. Pour terminer, les plus récents travaux de recherche dans le domaine des composants audio-optiques sont mentionnés.

1. Einleitung

Auf der Basis von akustischen Oberflächenwellen (SAW: *S*urface *A*coustic *W*aves), die sich auf der Oberfläche von piezoelektrischen Kristallen ausbreiten, lassen sich analoge Signalverarbeitungselemente, wie Laufzeitleitungen, Bandfilter, Oszillatoren, Korrelatoren und Konvolver bauen. Die besondere Bedeutung dieser Bauelemente liegt einerseits in der möglichen Miniaturisierung und in der grossen Entwurfsfreiheit (Laufzeitleitungen, Bandfilter), andererseits in ihrer ausserordentlich hohen Signalverarbeitungskapazität (Korrelatoren, Konvolver).

Ein Vergleich mit digitalen integrierten Halbleiterschaltungen [1] zeigt die Möglichkeiten von SAW-Komponenten eindrücklich. Im Extremfall kann ein Signal mit einer Bandbreite von B = 500 MHz und einer Dauer T = 20 µs mit einer Referenz korreliert werden. Ein digitaler Korrelator müsste für die gleiche Aufgabe mit einer Taktfrequenz von $2B$ total $T \cdot B$ Multiplikationen parallel ausführen. Da eine 8×8-Bit-Multiplikation etwa G = 1000 Gatter benötigt, ergibt dies eine FTR (Functional Throughput Rate) von FTR = $2T \cdot B^2 G = 10^{16}$ Gate·Hz. Heutige digitale Halbleiterschaltungen erreichen eine FTR von 10^{11} bis 10^{12} Gate·Hz (Fig. 1) [1]. Das VHSIC-Forschungsprogramm (*V*ery *H*igh *S*peed *I*ntegrated *C*ircuits) der amerikanischen Regierung zielt auf eine FTR von 10^{13} Gate·Hz und dürfte damit eine praktische Grenze für integrierte Halbleiterschaltungen erreichen.

Die 35. Schweizerische Tagung für elektrische Nachrichtentechnik (STEN) fand am 22. Juni 1982 in Bern statt und vereinigte 230 Fachleute.

2. Grundlagen

Akustische Oberflächenwellen auf Festkörpern breiten sich ähnlich wie Wasserwellen entlang der Oberfläche aus und erleiden kaum Verluste infolge Abstrahlung in das Festkörpervolumen. Aufgrund ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 3 ... 4 km/s weisen sie etwa 100 000mal grössere Laufzeiten als elektromagnetische Wellen auf. Da sie nicht dispersiv sind, hängt ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit nur von den Materialkonstanten ab.

Der grundsätzliche Aufbau eines SAW-Bauelementes ist sehr einfach (Fig. 2). Auf einem piezoelektrischen Substrat (z. B. Quarz, Lithiumniobat usw.) sind ein Eingangswandler und ein Ausgangswandler in der Form von ineinandergreifenden Elektrodenkämmen (sog. Interdigitalwandler) angeordnet. Durch verschiedenartige Gestaltung der Wandler (Veränderung der Position und der Überlappung der einzelnen Elektroden) kann deren Frequenzverhalten in starkem Masse beeinflusst werden.

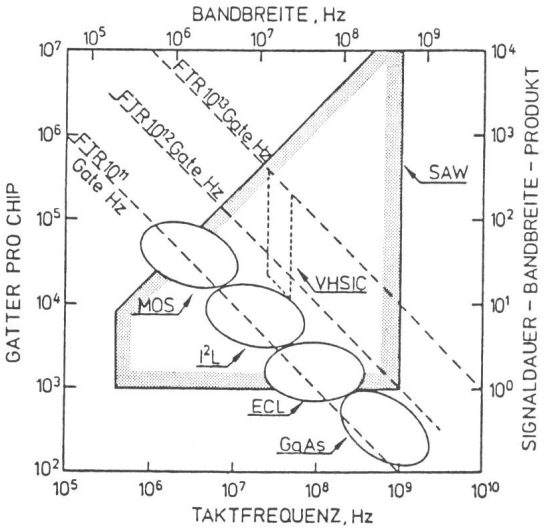

Fig. 1 Vergleich der Signalverarbeitungskapazität von SAW-Komponenten und digitalen integrierten Halbleiterschaltungen
MOS, I^2L, ECL, GaAs: diverse Herstelltechnologien von Halbleiterschaltungen

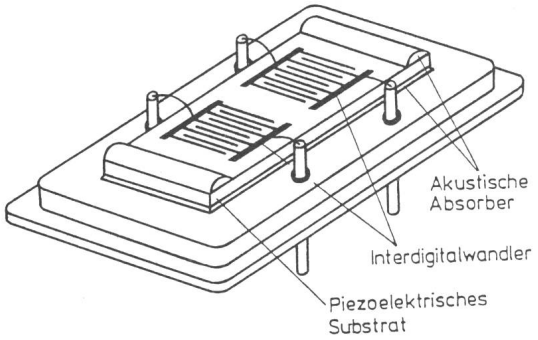

Fig. 2 Aufbau eines SAW-Bauelementes

2.1 Der Entwurf der Interdigitalwandler

Das Entwurfsziel ist ein elektromechanischer Wandler mit vorgegebener Frequenzcharakteristik (in Betrag und Phase). Die Übertragungsbandbreite kann sehr breit (z. B. breitbandige Laufzeitleitungen) oder aber extrem schmal (z. B. Resonatoren) sein. Im Durchlassbereich sollten überdies möglichst wenig Umwandlungsverluste auftreten.

Der Entwurf erfolgt vorzugsweise im Zeitbereich. Ein elektrischer Impuls am Klemmenpaar des Wandlers erzeugt ein Wellenpaket (mit einer Wellenlänge pro Elektrodenpaar), das sich anschliessend entlang der Oberfläche ausbreitet. Dieses Wellenpaket ist also die Impulsantwort des Wandlers, und ihre Fouriertransformierte ergibt die Frequenzcharakteristik (Fig. 3). Die Synthese einer Wandlerstruktur erfolgt in umgekehrter Richtung. Eine Frequenzcharakteristik nach Betrag und Phase ist vorgegeben und über die Fouriertransformation wird die zu realisierende Impulsantwort erhalten. Über eine Gewichtung (z. B. Überlappungsvariation in Fig. 4) kann der Beitrag eines jeden Elektrodenpaares in der richtigen Grösse gewählt werden. Bei derartig gewichteten Wandlern (engl: Apodization) ist die Impulsantwort also in der Wandlerstruktur als Gewichtungsfunktion direkt sichtbar.

Die erfolgreiche Realisierung einer vorgegebenen Frequenzcharakteristik des gesamten SAW-Bauelementes bedingt überdies die Berücksichtigung einiger Effekte 2. Ordnung, wie Regeneration, Reflexionen und Beugungseffekte. Durch genaue Modellierung dieser Effekte sind in jüngster Zeit gute Resultate erzielt worden.

2.2 Die technologischen Anforderungen

Übertragungsfunktionen mit einer Genauigkeit von 0,1 dB in der Amplitude und einigen ns in der Gruppenlaufzeit bedingen die Herstellung von SAW-Bauelementen mit extrem engen Toleranzen. Bei Leiterbahnbreiten bis zu

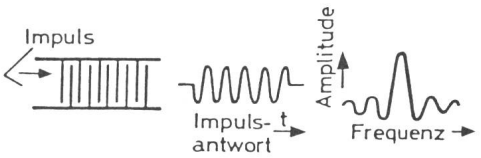

Fig. 3 Zusammenhang zwischen der Struktur und der Frequenzcharakteristik eines Interdigitalwandlers

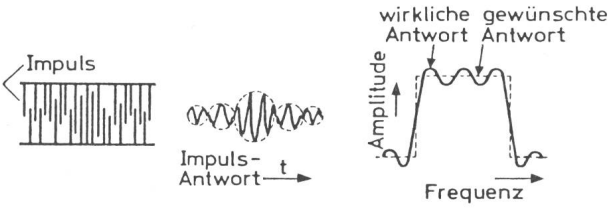

Fig. 4 Die Synthese einer vorgegebenen Übertragungsfunktion

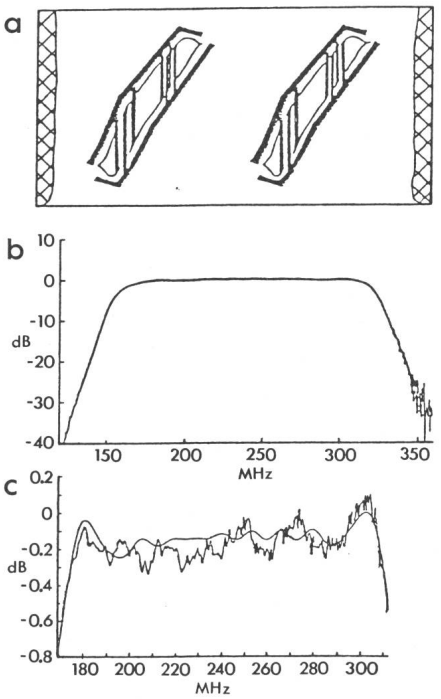

Fig. 5 Breitbandige SAW-Laufzeitleistung
a Wandleranordnung
b gemessene Übertragungsfunktion (3,5 µs Laufzeit)
c Vergleich der gemessenen und der gerechneten Übertragungsfunktion (vergrösserter Ausschnitt von b)

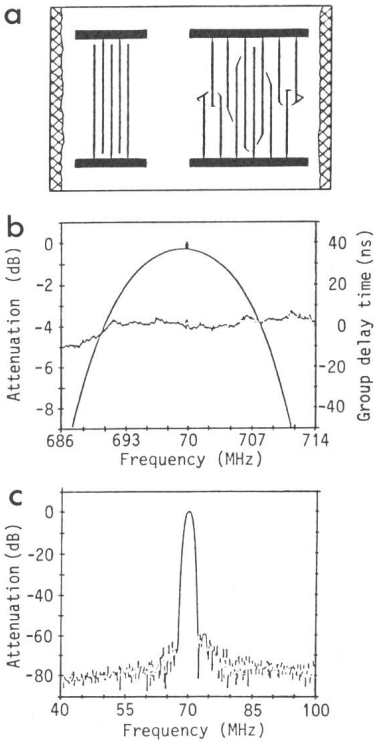

Fig. 6 SAW-Bandpassfilter
a Wandleranordnung
b, c gemessene Übertragungsfunktion eines 70-MHz-Filters

1 µm und weniger muss eine Positioniergenauigkeit von 0,1 µm über Entfernungen bis zu 10 cm aufrechterhalten werden. Dies gelingt durch den Einsatz modernster fotolithographischer Verfahren (Projektionsstrukturübertragung) und einer rechnergesteuerten Prozesstechnik.

Der Anwendungsbereich der SAW-Technik wird durch physikalische, technologische und wirtschaftliche Faktoren begrenzt. Mit der heute beherrschten Strukturauflösung lassen sich noch Wellen bei 1 GHz (mit einer Wellenlänge von etwa 3 µm) anregen. Oberhalb dieser Frequenz nimmt die materialbedingte Dämpfung stark zu. Eine untere Frequenzgrenze sowie die erzielbare Laufzeit ergeben sich aus der wirtschaftlich noch zu vertretenden Substratgrösse. Tabelle I [1] fasst die Grenzen zusammen.

Grenzen des Anwendungsbereiches von SAW-Bauelementen Tabelle I

	Minimum	Maximum
Mittenfrequenz	10 MHz	1 GHz
Bandbreite	10 KHz	500 MHz
Laufzeit	100 ns	50 µs

Im folgenden sollen die verschiedenen SAW-Bauelemente kurz vorgestellt und in ihrer Funktionsweise erklärt werden.

3. Laufzeitleitungen

Zeitliche Verzögerungen werden in der Signalverarbeitung häufig benötigt. Grosse Bandbreiten und eine konstante Gruppenlaufzeit sind zwei wesentliche Anforderungen, die an eine Laufzeitleitung gestellt werden müssen. Figur 5 zeigt das Beispiel einer 3,5-µs-Verzögerungsleitung, deren Übertragungsfunktion über eine Bandbreite von 120 MHz eine Welligkeit von weniger als ±0,1 dB aufweist [3]. Die grosse Bandbreite wird durch einen variablen Elektrodenabstand in den Wandlern erreicht. Die hohen Frequenzen werden im Bereich kleiner Abstände, tiefere Frequenzen im Bereich grösserer Abstände angeregt. Die identische Struktur beider Wandler bewirkt einen konstanten Abstand zwischen den (frequenzabhängigen) Erregerzentren, womit eine konstante Verzögerung (Gruppenlaufzeit) erreicht werden kann. Das Schrägstellen der Wandler bewirkt, dass angeregte Wellen nur mit einer minimalen Anzahl anderer Elektroden in Wechselwirkung treten. Diese Massnahme, zusammen mit dem Einsatz von «Spalt-Elektroden» (in Figur 5 nicht gezeigt), bewirkt eine Unterdrückung von ungewünschten Reflexionen innerhalb der Wandler um 60 dB gegenüber dem Nutzsignal.

4. Bandpassfilter

Bandpassfilter sind wohl die am häufigsten eingesetzten Bauelemente der Signalverarbeitung. Für ihre Realisierung bietet die SAW-Technik gute Voraussetzungen. Die Über-

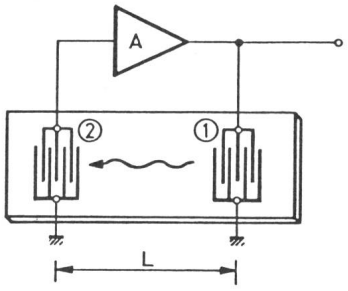

Fig. 7 Prinzipschaltung eines SAW-Oszillators mit einer Laufzeitleitung

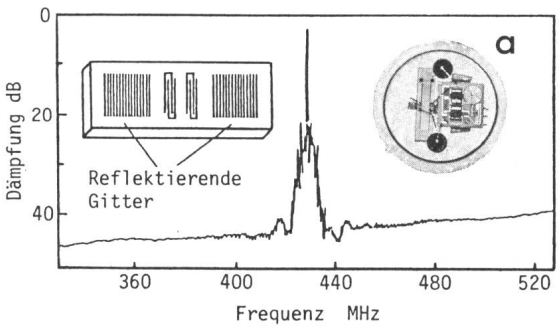

Fig. 8 Übertragungsfunktion eines SAW-Resonators mit einer Güte von 12 000 bei 428 MHz, mit eingesetzter schematischer Darstellung und der Realisation (a) des gesamten Oszillators im TO-8-Gehäuse

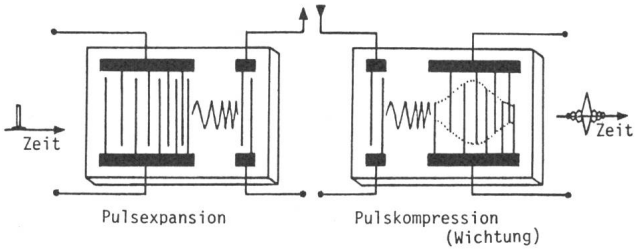

Fig. 9 Schematische Darstellung der Impulskompression

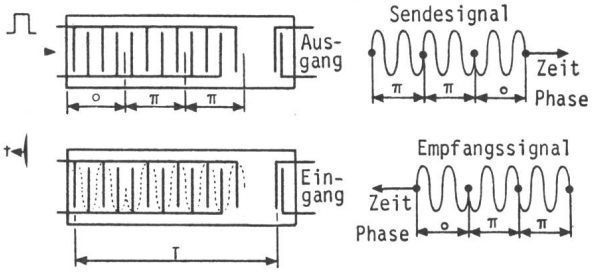

Fig. 10 Prinzip der Korrelation eines PSK-Signales

tragungsfunktion eines SAW-Filters wird durch die Frequenzcharakteristik der Wandler bestimmt, deren Synthese nach Kapitel 2.2 erfolgt (Fig. 6). Durch Berücksichtigung von Effekten 2. Ordnung ist es möglich, Filter mit 60 dB Sperrdämpfung und weniger als 0,1 dB Amplituden- bzw. 3 ns Gruppenlaufzeitfehler herzustellen. Um den Einfluss des Umgebungsnetzwerkes des Bauelements auf dessen Übertragungsfunktion zu reduzieren, werden SAW-Filter zwecks Entkopplung stark fehlangepasst. Dies führt zu grosser Einfügungsdämpfung, dem hauptsächlichen Schwachpunkt in den Eigenschaften von SAW-Filtern. Neue Wandlerstrukturen [4] und umfassende Syntheseverfahren suchen auch hier eine Verbesserung zu bringen.

5. Oszillatoren

SAW-Oszillatoren werden mit Hilfe von Laufzeitleitungen im Rückkopplungspfad realisiert, deren Phasensteilheit durch die Laufzeit einstellbar ist. Durch geeignete Dimensionierung der Wandler wird erreicht, dass innerhalb des Übertragungsbereiches der Leitung ein einziger Nulldurchgang der Phase erfolgt. Durch entsprechende Wahl der Laufzeit, und damit der Phasensteilheit, gelingt es, Frequenzstabilität und Ziehbereich (falls nötig) optimal aufeinander abzustimmen (Fig. 7).

Oszillatoren, die Volumenwellen in Schwingquarzen ausnutzen, sind in einem weiten Temperaturbereich auf wenige ppm stabil. SAW-Oszillatoren erreichen die gleiche Stabilität nur in einem engeren Bereich, haben aber dafür andere Vorteile, wie hohe Grundfrequenz (bis 1 GHz) mit sehr guter Vibrationsunempfindlichkeit.

Für hohe Anforderungen an die Frequenzstabilität eignen sich SAW-Resonatoren mit neben den Wandlern reflektierenden Gittern (Fig. 8). Diese Resonatoren zeigen keine Nebenresonanzen und benötigen keine zusätzliche Beschaltung. Es ist deshalb möglich, einen kompletten Oszillator in einem TO-8-Gehäuse unterzubringen.

6. Korrelatoren

Auf dem Gebiet der analogen (Echtzeit-) Korrelatoren ist die SAW-Technik heute praktisch konkurrenzlos.

In der Radartechnik verwendet man linear frequenzmodulierte Signale, um die Bandbreite (und dadurch das räumliche Auflösungsvermögen) zu vergrössern. Dieses Signal (sog. FM-Chirp) wird erzeugt, indem ein Interdigitalwandler mit eben der gewünschten Impulsantwort mit einem kurzen Impuls angeregt wird (sog. Impulsexpansion, Fig. 9). Im Empfänger wird das derart zeitlich expandierte Signal durch Korrelation mit sich selbst zeitlich wieder komprimiert. Die Impulsantwort des für die Impulskompression benutzten Wandlers ist eine zeitverkehrte Kopie der Impulsantwort des Expansionskorrelators. Dieses Verfahren gestattet es, Signale aus dem Rauschen zu heben und damit die Reichweite eines Radarsystems zu vergrössern. Der sogenannte Prozessgewinn ist gleich dem Produkt aus Signalbandbreite und Signaldauer.

Linear frequenzmodulierte Signale zeichnen sich durch Unempfindlichkeit gegenüber Dopplerfrequenzverschiebung aus. Andererseits ist die geringe Vielfalt der möglichen Signalformen für viele Anwendungen eine Einschränkung.

Grössere Freiheiten bieten hier binär phasenmodulierte Signale (PSK: Phase Shift Keying). Für die Erzeugung und die Korrektion von PSK-Signalen werden Laufzeitleitungen mit Anzapfungen verwendet, die mit einer der PSK-Modulation entsprechenden Phase an Sammelelektroden angeschlossen werden (Fig. 10). Im Prinzip ist es möglich, die Anzapfungen nach aussen zu führen und über Diodenschalter programmierbar zu steuern. Mit zunehmender Anzahl von Anzapfstellen (> 100) steigt aber der Aufwand unverhältnismässig stark an.

7. Konvolver

Die Korrelation und die Faltung sind mathematisch sehr ähnliche Operationen.

Auch Korrelatoren und Konvolver sind im Prinzip vergleichbar. Während jedoch der Korrelator ein Eingangssignal im allgemeinen mit einer «eingebauten» Impulsantwort korreliert, faltet der Konvolver (im mathematischen Sinn) zwei (in gewissen Grenzen) beliebige Signale. Der Konvolver besteht im wesentlichen aus einer Laufzeitleitung mit einer zusätzlichen Ausgangselektrode, die entlang der Laufstrecke angeordnet ist (Fig. 11). Speist man in den einen Wandler ein Signal $G(t)$ und in den zweiten Wandler ein Referenzsignal $F(t)$ mit genügend hohem Leistungspegel ein, dann werden die zwei gegeneinander laufenden Wellenzüge aufgrund einer Nichtlinearität miteinander multipliziert. Die die Laufstrecke überdeckende Elektrode summiert alle örtlichen Produkte und besorgt damit die Integration. Unter der Vorausetzung, dass sich Signal und Referenz nur im Bereich der Ausgangselektrode überlappen, entsteht am Ausgang ein Signal, das der Faltung der beiden Eingangssignale proportional ist. Für die Anwendung ist der Rauschabstand des Ausgangssignales entscheidend. Bei der maximal zulässigen Eingangsleistung von +20 dBm beträgt der Rauschabstand des Ausgangssignales rund 60 dB. Mit einer Bandbreite von 100 MHz und einer Signaldauer von z.B. 10 µs kann der SAW-Konvolver PSK-Signale mit bis zu 1000 Impulsen korrelieren. Er führt dabei das Äquivalent von 10^{11} Multiplikationen pro Sekunde aus und bietet damit eine konkurrenzlos hohe Signalverarbeitungskapazität.

Ein Weiterentwicklung des einfachen Konvolvers ist der Speicherkonvolver. Anstelle einer einfachen Ausgangselektrode tritt ein Schottky-Dioden-Array.

Das dem Produkt von Signal und Referenz proportionale elektrische Feld, das durch den piezoelektrischen Effekt hervorgerufen wird, bewirkt eine Ladungsverschiebung in den Dioden. Eine geeignete Vorspannung der Ausgangselektrode verhindert nach dem Verschwinden der Ursache den Ladungsausgleich durch Sperrpolarisation des Schottkyüberganges. Auf dieses Art kann ein Wellenzug, eine Faltung oder eine Autokorrelation gespeichert werden. Der Auslesevorgang geschieht mit Hilfe eines kurzen akustischen Impulses, der jede Diode «abtastet», worauf deren Sperrspannung am Ausgang erscheint. Eine andere Möglichkeit der Auslesung besteht darin, die getrennten Ladungen wieder freizugeben, worauf sich die mechanische Störung beidseitig in Richtung der Wandler ausbreitet.

Wird nun in einem ersten Arbeitsgang eine Referenz $F(t)$ als Wellenzug in der Diodenmatrix abgespeichert, so kann in einem nachfolgenden Vorgang das Signal $G(t)$ eingespeist werden. An der Ausgangselektrode erscheint in diesem Fall die Faltung $F(t)*G(t)$. Das elektro-akustische Bauelement arbeitet also als programmierbarer Konvolver.

8. Akusto-optische Bauelemente

Akusto-optische Bauelemente werden oft als Bausteine der integrierten Optik betrachtet. Diese Bauelemente nutzen Wechselwirkungen zwischen akustischen Wellen und einem Laserstrahl aus, der sich in einem Dünnfilm parallel zur Oberfläche eines SAW-Substrates ausbreitet. Die Oberflächenwellen bewirken entweder eine periodische Störung der Randbedingungen des Dünnfilms, der als Wellenleiter für den Laserstrahl dient, oder aber eine periodische Ände-

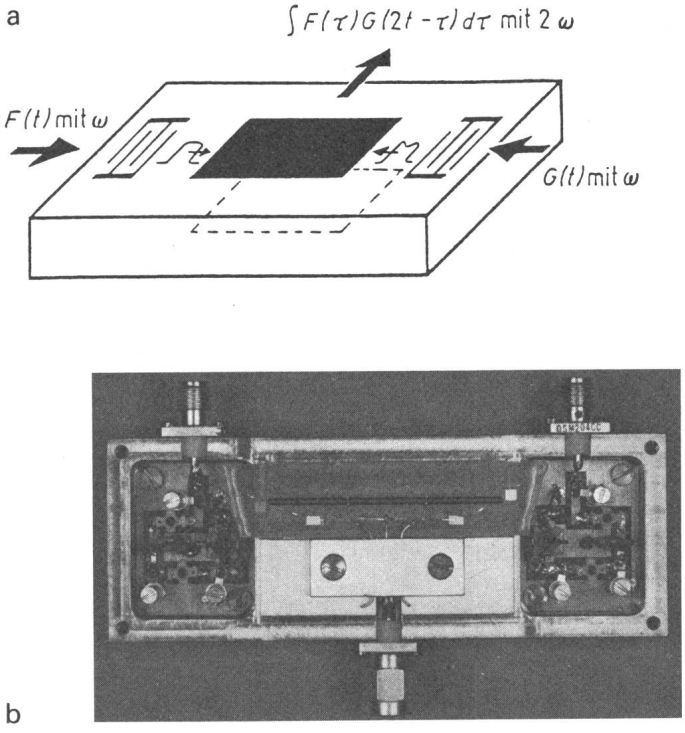

Fig. 11 Schematische Darstellung (a) und Realisierung (b) eines SAW-Konvolvers

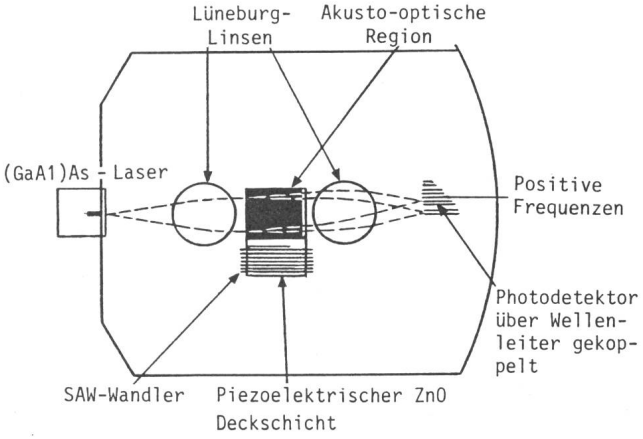

Fig. 12 Monolithischer akusto-optischer Spektrumanalysator

rung des Brechungsindexes des Ausbreitungsmediums. Da die Periodizität beider Störungen in der Grössenordnung der Lichtwellenlänge liegt, haben diese Störungen einen grossen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten des Laserstrahls.

9. Der akusto-optische Spektrumanalyzer

Der akusto-optische Spektrumanalyzer oder integrierte optische Spektrumanalyzer IOSA beruht auf einem einfachen Prinzip (Fig. 12). Eine Laserdiode strahlt ihr Licht in einen Wellenleiter auf einem piezoelektrischen Substrat. Dieser Lichtstrahl wird durch eine Linse kollimiert, bevor er in das Gebiet der akusto-optischen Wechselwirkungen eintritt. In diesem Gebiet wird durch eine Oberflächenwelle, die nahezu senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls läuft, ein optisches Gitter simuliert (periodische Änderung des Brechungsindex), an welchem der Laserstrahl abgelenkt wird. Der Ablenkwinkel ist direkt von der Gitterkonstante, also von der Frequenz der Oberflächenwelle abhängig. Dieser Ablenkwinkel wird mittels eines Diodenarrays detektiert und verarbeitet.

Der IOSA kann z. B. Signale in eine Bandbreite von 500 MHz kontinuierlich (d. h. mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit einer «Burst»-Übermittlung = 100%) analysieren.

10. Ausblick

Die Forschung auf dem Gebiet der SAW-Technik und der kombinierten (akusto-elektrischen, -optischen) Bauelemente läuft auf Hochtouren. Mittelfristig sind auf diesem Gebiet sicher interessante neue Bausteine zu erwarten, die hoffentlich möglichst ohne Verzögerung Eingang in die Systementwicklung finden.

Literatur

[1] *R. Veith:* SAW-Komponenten für Spread Spectrum Systeme. Nachrichtentechnisches Kolloquium der Universität Bern, 1982.

[2] *A. Barna:* Very high speed integrated circuits. Technologies and tradeoffs. New York, J. Wiley, 1981.

[3] *H.R. Stocker* et. al.: Octave bandwidth high performance SAW delay lines. Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium, november 5...7, 1980, Boston/MA, paper II-5.

[4] *F. Nyffeler:* Detailed investigation on the group type unidirectional interdigital SAW transducer with its application to low loss surface wave filters. Proceedings of the 6th European Microwave Conference, september 14...17, 1976, Rome.

Adresse des Autors

Dr. *F. Nyffeler,* Siemens-Albis AG, Abt. ETG3, Postfach, 8047 Zürich.