

높은 격리도와 고속 스위칭의 PIN 다이오드 스위치

A PIN Diode Switch with High Isolation and High Switching Speed

주 인 권 · 염 인 복 · 박 종 흥

Inkwon Ju · In-Bok Yom · Jong-Heung Park

요 약

직렬 PIN 다이오드 스위치의 격리도는 PIN 다이오드의 병렬 커패시턴스에 의해 제한을 받으며, 스위치 구동 회로는 PIN 다이오드 스위치의 스위칭 속도를 제한한다. 이런 문제를 극복하기 위해, 병렬 공진 인덕턴스와 TTL 호환의 스위치 구동회로가 적용된 높은 격리도와 고속 스위칭의 PIN 다이오드 스위치를 제안하였다. 3 GHz PIN 다이오드 스위치의 측정 결과, 1 GHz의 주파수 대역폭, 1.5 dB 이내의 삽입 손실, 65 dB의 격리도, 15 dB 이상의 반사 손실 그리고 30 ns 이내의 스위칭 속도를 나타내었다. 특히, 병렬 공진 인덕턴스를 사용한 3 GHz 스위치는 15 dB의 격리도 향상을 나타내었다.

Abstract

The isolation of the series PIN diode switch is restricted by the parallel capacitance of PIN diode and the switch driver circuit limits switching speed of PIN diode switch. To overcome these problems, a high isolation and high switching speed Pin diode switch is proposed adapting the parallel resonant inductance and TTL compatible switch driver circuit. The measurement results of the 3 GHz PIN diode switch show 1 GHz frequency band, less than 1.5 dB insertion loss, 65 dB isolation, more than 15 dB return loss and less than 30 ns switching speed. In particular the 3 GHz PIN diode switch using the parallel resonant inductance exhibits the improvement of isolation by 15 dB.

Key words : Microwave Switches, PIN Diodes, Microwave Integrated Circuits, Isolation

I. 서 론

마이크로파 및 밀리미터파 대역에서 사용되어지는 시스템에서 채널 수가 증가함에 따라 원하는 신호의 경로를 형성하고 원하지 않는 신호의 경로는 차단하는 스위치가 점차 많이 사용되어지고 있다.

스위치는 높은 격리도, 저손실, 고속 스위칭 속도, 정합, 광대역성, 높은 선형성, 저전력 소모, 온도 안정성, 작은 회로 크기, 구동회로의 단순함 등이 요구된다^[1].

스위치 소자는 PIN 다이오드와 FET가 많이 사용되어진다. FET는 PIN 다이오드에 비해 고속 스위칭이 가능하고 전력 소모가 적으나 선형성이 나쁘고

높은 격리도를 얻기 어렵다.

본 논문에서는 스위치용 PIN 다이오드를 스위칭 소자로 사용하였으며, 병렬 공진 인덕턴스를 이용해 PIN 다이오드의 병렬 커패시턴스를 제거하여 격리도가 향상된 스위치를 구현하였다. 또한 TTL 제어 신호와 호환되는 구동회로는 고속 스위칭이 가능하도록 설계되었다.

II. 설 계

2-1 PIN 다이오드 모델링

PIN 다이오드는 RF 주파수에서 거의 순수하게 레지스턴스 성분만을 가지며, 이 레지스턴스 또한 DC

한국전자통신연구원 통신위성연구그룹(Communications Satellite Development Group, ETRI)

· 논문 번호 : 20041105-10S

· 수정완료일자 : 2004년 12월 10일

혹은 저주파의 제어 전류로 수 Ω에서 수십 kΩ의 범위 내에서 조절 가능하다. PIN 다이오드를 제어하는 제어 전류를 연속적으로 변화시켜 RF 신호의 레벨을 조절하거나, AM 변조를 할 수 있다. 또한 이 제어 전류를 On, Off 시키거나, 일정한 간격으로 가변시켜 RF 신호의 스위칭이나, 펄스 변조, 감쇄, 위상천이 등을 할 수 있다.

PIN 다이오드는 여러 제조사에서 생산되고 있으나, Alpha사의 APD0805-000을 PIN 다이오드 모델링에 이용한다. 또한 Alpha사의 APD0805-000에 대한 데이터시트에는 SPICE 모델 파라미터 및 RF 특성 그래프가 있어 모델링이 수월하다. DC 특성을 모델링하기 위한 SPICE 모델 파라미터가 데이터시트에 없다면 PIN 다이오드의 전압 전류 특성을 측정하여 SPICE 모델 파라미터를 추출해 내야 한다. 또한 고주파(보통, 1 GHz)에서 측정된 입력 전류 대 RF 저항을 제시한 RF 특성 그래프가 없다면 측정을 통해 얻을 수 있다.

그림 1은 상용 시뮬레이터인 ADS™를 이용한 PIN 다이오드 APD0805-000의 모델이다. PIN 다이오드는 PN-접합 다이오드 모델과 PIN 다이오드 모델을 결합하여 모델링 하였다. 일반적으로 PIN 다이오드는 전류 제어형 소자이지만, 이렇게 모델링된 PIN 다이오드는 전압 제어형 소자로 모델링 할 수 있다.

모델에 나타난 PN-접합 다이오드는 PIN 다이오드

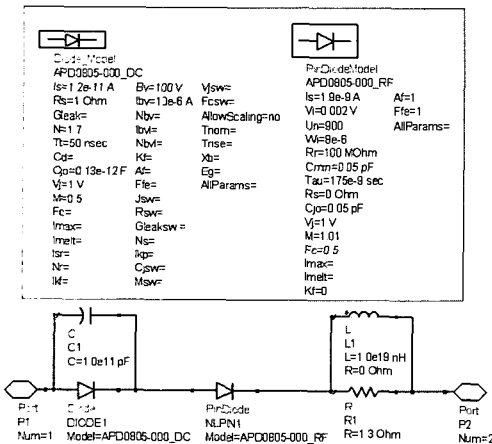


그림 1. ADS™ 상에서 구현된 PIN 다이오드 APD-0805-000의 모델
Fig. 1. PIN diode APD0805-000 model for ADS™.

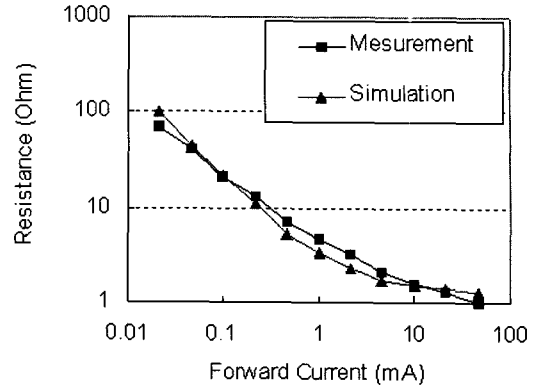


그림 2. 주파수 1 GHz에서 측정된 RF 저항과 모델링된 RF 저항 대 순방향 전류
Fig. 2. Measured and modeled RF resistance vs. forward current at 1 GHz.

의 DC 특성을 모델링 하기 위한 SPICE 모델이다. 이 다이오드는 RF 주파수에서는 바이패스 캐패시터 C1에 의해 보이지 않게 된다. RF 특성은 PIN 다이오드 모델로 나타낸다. R1은 잔여 직렬 레지스턴스(Residual series resistance)를 반영하며, RF 특성 그래프의 낮은 저항 구간(수 Ω 이내)에 영향을 끼친다. 인덕터 L1은 DC 상에서 R1을 단락시켜 R1이 PIN 다이오드의 DC 특성에 영향을 미치는 것을 방지한다. RF 특성 그래프는 PIN 다이오드가 RF 입력력 선로에 대해 shunt로 연결되었을 때의 특성을 나타낸다. 입력 전류를 변화시키면서 측정된 삽입 손실 이용하여 식 (1)로부터 RF 저항 Rs를 구할 수 있다.

$$R_s = Z_0 / 2 * (10^{dB(S21)/20} - 1) \quad (1)$$

여기서, Rs는 PIN 다이오드의 RF 저항,

Z0는 시스템의 특성 임피던스

측정된 RF 특성 혹은 데이터시트상의 RF 특성 그래프를 기준으로 삼아, PIN 다이오드 모델 파라미터 중에 Vi(I-Region Forward Bias Voltage Drop)를 변경시키면서 fitting 한다. 그림 2는 주파수 1 GHz에서 측정된 RF 저항과 모델링된 RF 저항을 나타낸다. 측정값과 유사하게 RF 저항이 모델링 되었음을 알 수 있다.

2-2 스위치 설계

스위치 구조는 Quadrature Matched Hybrid Attenuator(직렬 및 병렬 연결 다이오드), Reflection-Type

Attenuator, Balanced Attenuator 구조 등을 고려할 수 있으나, 최대 격리도에서의 bias 동작점을 잡기 어렵거나, 스위치 Off 시에 더 많은 전력 소모를 가지는 등의 단점이 있다^{[2],[3]}.

1/4 파장 정합형 스위치 구조는 직렬 및 병렬 구조로 구현할 수 있다. 직렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치는 식 (2)의 감쇠 특성을 가진다. 즉 PIN 다이오드의 RF 저항 R_s 가 감소함에 따라 감쇠량이 증가한다. 직렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치는 R_s 가 작을 때 큰 격리도를 얻을 수 있으나, R_s 가 감소하면 그림 2에서 보는 바와 같이 전류 소모가 큰 단점이 있다.

$$A(dB) = 20 \log \left(1 + \frac{Z_0}{R_s} \right) \quad (2)$$

여기서, A 는 감쇠량, R_s 는 PIN 다이오드의 RF 저항

종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치는 그림 3과 같다^[4]. 종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치에 순방향 바이어스가 가해진 경우를 살펴보면, 입력된 제어 전압에 의한 제어 전류는 PIN 다이오드 D1과 D2를 거쳐 흐른다. 이 때 PIN 다이오드 D1과 D2의 임피던스는 수 Ω 이 되며 이상적으로는 영에 가까워진다.

저항 R_1 은 PIN 다이오드 D2와 병렬 연결되어 있고, $R_1 \gg D_2$ 이므로 B점에서의 임피던스는 D2의 임피던스에 의해 결정된다. 한편, A점에서 PIN 다이오드 D2쪽을 바라본 임피던스는 1/4 파장의 단락 스테

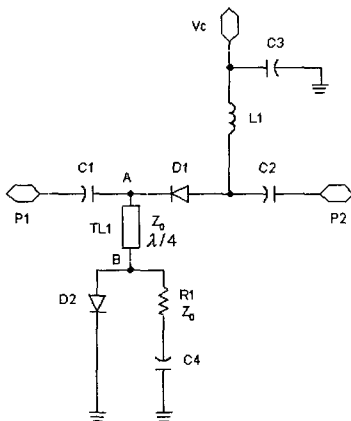


그림 3. 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치
Fig. 3. Shunt connected quarter-wave matched switch.

브를 바라본 것과 같으므로 이상적으로 임피던스가 무한대가 된다.

따라서 순방향 바이어스가 가해진 경우 1/4 파장의 단락 스테르브가 분로(shunt)로 있는 구조가 된다. 그러므로 순방향 바이어스가 가해진 경우에 삽입 손실은 최소가 되며 입력단 반사 손실은 1/4 파장의 전송 선로의 길이에 따라 특정 주파수에 정합되는 특성을 가진다.

반면 종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치에 역방향 바이어스가 가해진 경우를 살펴보면, PIN 다이오드 D1과 D2의 임피던스는 수십 k Ω 의 저항 값을 가진다. 저항 R_1 은 PIN 다이오드 D2와 병렬 연결되어 있고, $R_1 \ll D_2$ 이므로 B점에서의 임피던스는 R_1 의 임피던스에 의해 결정된다. 한편, A 점에서 D2쪽을 바라본 임피던스는 1/4 파장의 임피던스 변환기를 바라본 것과 같으므로 이상적으로 임피던스는 Z_0 가 된다.

따라서, Z_0 의 임피던스를 가진 저항이 분로로 있고 수십 k Ω 의 저항이 직렬로 연결되어 있는 구조가 된다. 그러므로 역방향 바이어스가 가해진 경우에 삽입 손실은 최대가 되며 입력단의 반사 손실은 1/4 파장의 전송 선로의 길이에 따라 특정 주파수에 정합되는 특성을 가진다.

그림 4는 그림 3의 종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치의 모의 시험 결과를 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치는 제어 전압이 감소함에 따라 감쇠가

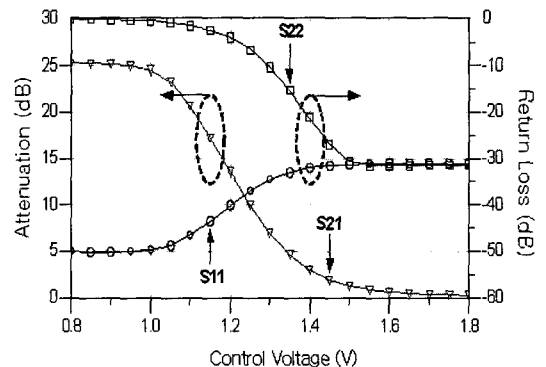


그림 4. 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results of shunt connected quarter-wave matched switch.

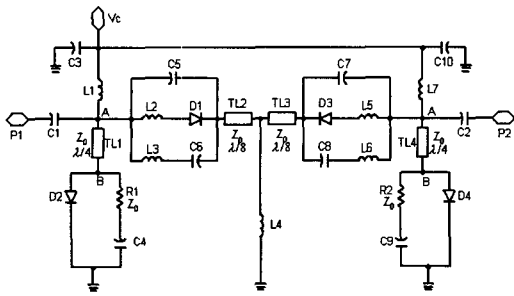


그림 5. 병렬 공진 인덕터를 적용한 스위치
Fig. 5. The proposed switch with a parallel resonant inductor.

약 25 dB까지 증가한다. 입력단 정합은 감쇠 가변 혹은 제어 전압에 관계 없이 -30 dB 이하를 나타내어 정합이 잘 되었으나, 출력단 반사 손실은 감쇠가 증가함에 따라 혹은 제어 전압이 감소함에 따라 0 dB에 수렴하여 정합이 매우 나빠짐을 알 수 있다. 그러므로 종래의 병렬 구조의 1/4 파장 정합형 스위치는 감쇠가 증가함에 따라 출력단의 정합이 나빠지며, 감쇠 범위도 약 25 dB로 협소한 문제점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 5와 같은 새로운 스위치 구조를 제안하였다. PIN 다이오드 D1과 D3는 1/8 파장 전송 선로 TL2 및 TL3로 연결되어 있으므로 1/4 파장 전송 선로로 연결되어 있는 것과 같다. 두 개의 PIN 다이오드를 직렬로 바로 연결하면 감쇠량은 최대 6 dB 증가하지만, 두 개의 PIN 다이오드 사이에 직렬로 1/4 파장 전송 선로를 삽입하여 연결하면 감쇠량은 하나의 PIN 다이오드를 사용해서 얻는 값의 2배가 된다.

역방향 바이어스가 가해진 PIN 다이오드의 특성은 일반적으로 저항과 커패시터가 병렬 결합한 회로로 등가화할 수 있다. PIN 다이오드 D1 및 D3와 같이 PIN 다이오드가 RF 선로에 대해 직렬로 연결되어 사용될 때, PIN 다이오드의 병렬 커패시터스에 의한 RF 신호의 결합으로 감쇠량은 PIN 다이오드의 저항값에 의해 결정되지 않고 PIN 다이오드의 병렬 커패시터스에 의해 결정된다. 즉 역방향 바이어스가 가해진 PIN 다이오드의 등가 저항이 크다 할지라도 감쇠량은 그리 크지 않으며, PIN 다이오드의 병렬 커패시터스에 의해 감쇠량이 결정됨을 의미한다. 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$A(\text{dB})=10*\log_{10} [1+(4*\pi*f*C*Z_0)^{-2}] \quad (3)$$

여기서, A는 감쇠량, f=주파수(Hz), C=커패시턴스(F)

식 (3)에서 보는 바와 같이 주파수가 증가함에 따라, 커패시턴스가 증가함에 따라 감쇠량은 감소한다. 예를 들어, 0.1 pF의 병렬 커패시턴스를 가진 PIN 다이오드를 직렬 연결 감쇠기로 사용하여 주파수 2 GHz에서 얻을 수 있는 최대 감쇠량은 약 18 dB이며, 주파수 4 GHz에서 얻을 수 있는 최대 감쇠량은 약 12 dB이므로 감쇠 동작 범위가 매우 작다. 또한, 높은 감쇠량을 얻기 위해 병렬 커패시턴스가 매우 작거나 없는 PIN 다이오드를 구현하는 것은 물리적으로 한계가 있다.

이런 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 병렬 공진 인덕터를 사용하여 PIN 다이오드의 병렬 커패시터스의 효과를 공진시켜 제거하였다. 따라서 감쇠량은 PIN 다이오드의 RF 저항에 의해서만 결정되므로 감쇠량을 증대시킬 수 있다. 그림 5에서 PIN 다이오드 D1과 병렬로 인덕터 L3를 삽입하고, PIN 다이오드 D3와 병렬로 인덕터 L6를 삽입하여, PIN 다이오드의 병렬 커패시터스의 효과를 공진시켜 제거하였다. 커패시터 C6과 C8은 DC 차단용이다. 또한, PIN 다이오드 D1(D3)과 직렬로 연결된 인덕터 L2(L5), 그리고 병렬로 연결된 커패시터 C5(C7)는 병렬 공진 인덕터 L3(L6)과 조합하여 PIN 다이오드의 병렬 커패시터스의 효과를 제거하고, 감쇠량을 증대시킬 수 있다.

그림 6은 그림 5의 새로운 스위치 구조의 On 상태의 특성을 모의 시험한 결과이다. 주파수 3 GHz 대역에서 병렬 공진 인덕터의 사용에 관계없이 삽입 손실이 약 1 dB이며, 반사손실은 15 dB 이상으로 저손실, 정합 특성을 나타낸다. 병렬 공진 인덕터를 사용함에 따라 주파수 대역이 약 200 MHz 하향 이동하는 특성을 보여주고 있다. 그림 7은 그림 5의 새로운 스위치 구조의 Off 상태의 특성을 모의 시험한 결과이다. 주파수 3 GHz 대역에서 병렬 공진 인덕터의 사용에 관계없이 반사 손실은 17 dB 이상으로 감쇠가 최대일 때에도 정합이 잘 유지됨을 나타낸다. 병렬 공진 인덕터를 사용함으로써 Off때의 삽입손실은 3.4 GHz에서 약 18 dB 증가되었다. 즉 병렬 공진 인덕터를 사용하여 스위치의 격리도가 18 dB 개선

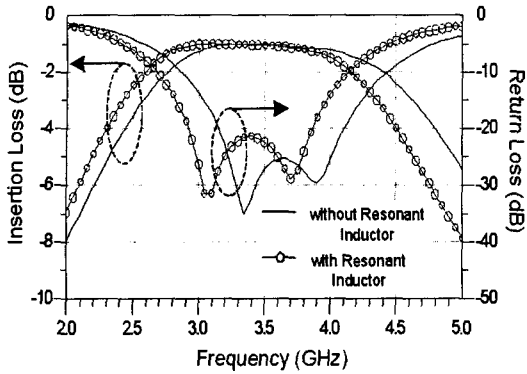


그림 6. 스위치 On 상태의 삽입 손실 및 반사 손실의 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulation results of the insertion loss and the return loss at On-state.

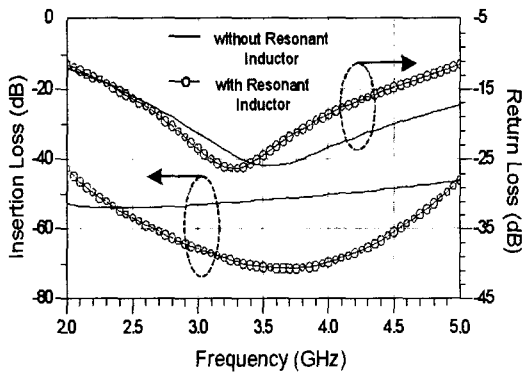


그림 7. 스위치 Off 상태의 삽입 손실 및 반사 손실의 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation results of the insertion loss and the return loss at Off-state.

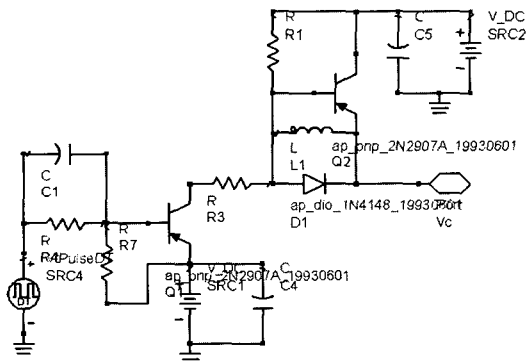


그림 8. 고속 스위치 구동회로

Fig. 8. The switch driver circuit with high switching speed.

되었다.

그림 8은 스위치 구동회로를 나타낸다. 스위치 구동 회로의 기능은 제어 신호원과 스위치 사이에서 전압 및 전류의 buffer 역할을 수행하는 것이다. 스위치 구동회로는 TTL 제어신호가 “zero”일 때 스위치를 구성하는 각 PIN 다이오드에 역방향 바이어스 전압을 공급하며, TTL 제어신호가 “One”일 때는 수십 밀리 암페어의 순방향 바이어스 전류를 공급한다. 스위치 구동회로를 사용하여 수십 ns 이내의 고속 스위칭이 가능하다.

III. 제작 및 시험

그림 9는 스위치의 기판 배치도를 나타낸 것이다. 기판은 15 mil 두께의 알루미늄을 사용하였다. 병렬 공진 인덕터 L3와 L6는 원형 맴돌이 인덕터 형태로 구현하였고, PIN 다이오드는 패키징 되지 않은 배어 칩을 사용하였으며, 커패시터는 사각형의 단일 층 (single layer) 커패시터를 사용하였다. 그림 9에서 인덕터 L2와 L5는 PIN 다이오드를 연결하는 금 와이어 본딩(gold wire bonding)으로 구현되어 있다. 그림 5의 커패시터 C5(C7)는 그림 9에서 PIN 다이오드 D1(D3)이 놓인 전송선로 TL2(TL3)와 전송선로 TL1(TL4) 사이의 간격에서 발생하는 RF 신호의 결합에 의한 커패시턴스를 의미한다. 그러므로 전송선로 TL2와 전송선로 TL1 간의 간격을 조절하여 커패시턴스를 조절할 수 있으며, 이 커패시턴스와 병렬 공진 인덕터를 조합하여 PIN 다이오드의 병렬 커패시턴스의 효과를 제거하고 감쇠량을 증대시킬 수 있다.

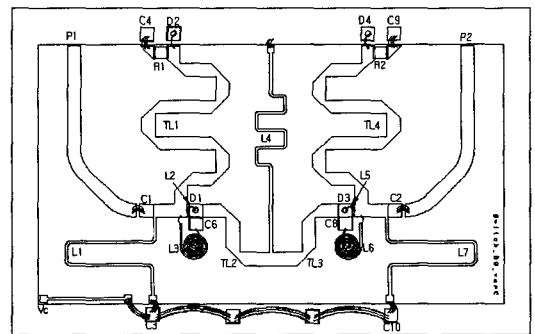


그림 9. 스위치의 기판 배치도

Fig. 9. The layout of the switch.

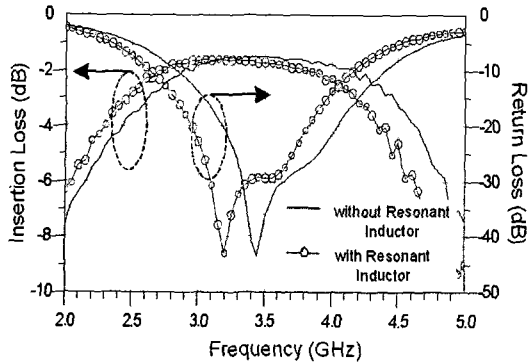


그림 10. 스위치 On 상태의 삽입 손실 및 반사 손실의 측정 결과

Fig. 10. Measured results of the insertion loss and the return loss at On-state.

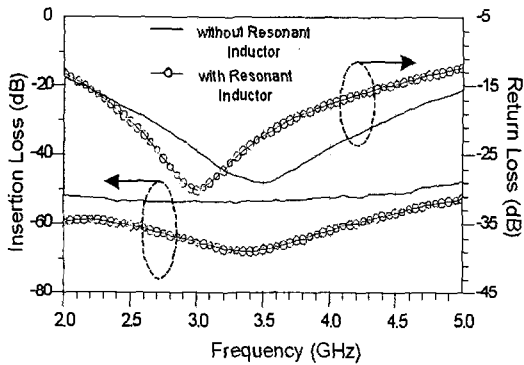


그림 11. 스위치 Off 상태의 삽입 손실 및 반사 손실의 측정 결과

Fig. 11. Measured results of the insertion loss and the return loss at Off-state.

그림 10은 새로운 스위치 구조의 On 상태의 특성을 측정된 결과이다. 주파수 3 GHz 대역에서 병렬 공진 인덕터의 사용에 관계없이 삽입손실이 약 1.5 dB이며, 반사손실은 15 dB 이상으로 저손실, 정합 특성을 나타낸다. 또한 이는 그림 6의 모의 시험 결과와 잘 일치한다. 그림 11은 Off 상태의 특성을 측정된 결과이다. 주파수 3 GHz 대역에서 병렬 공진 인덕터의 사용에 관계없이 반사손실은 17 dB 이상으로 감쇠가 최대일 때에도 정합이 잘 유지됨을 나타낸다. 병렬 공진 인덕터를 사용함으로써 Off 상태의 삽입손실은 3.4 GHz에서 약 15 dB 증가되었다. 즉 병렬 공진 인덕터를 사용하여 스위치의 격리도가 15 dB 개선되었음을 의미한다.

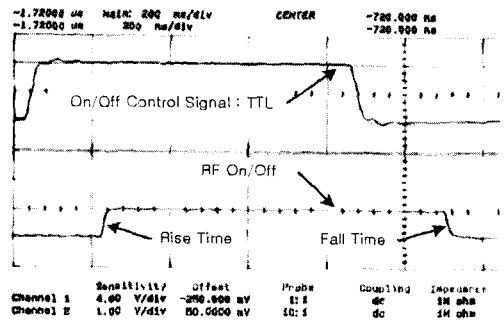


그림 12. 스위치의 스위칭 속도 측정 결과

Fig. 12. Measured result of the switching speed.

그림 12는 그림 8의 스위치 구동회로를 이용하여 스위치를 구동했을 때의 스위칭 속도를 측정된 결과이다. TTL 신호 형태의 On/Off 제어 신호는 함수 발생기를 통해 5 V의 구형파로 입력하였고, RF 신호는 Mixer를 이용해 오실로 스코프가 측정 가능한 주파수로 하향 변환하여 측정하였다. Rise time은 30 ns 이내, fall time으로 10 ns 이내로 측정되었다.

IV. 결론

본 논문은 3 GHz 주파수 대역에서 동작하는 PIN 다이오드 스위치의 설계, 제작, 시험결과를 보여준다. 본 논문의 PIN 다이오드 스위치는 1/4 파장 정합형 스위치 구조로 스위치 On/Off에 관계없이 항상 정합 상태를 유지하며, 공진 인덕터를 PIN 다이오드와 병렬 연결하여 공진 인덕터를 사용하지 않았을 때보다 15 dB 이상 격리도가 향상되었다. TTL 제어 신호와 호환되는 스위치 구동 회로는 고속 스위칭이 가능하도록 설계되었다. 제작된 스위치는 1 GHz 이상의 주파수 대역폭에서 1.5 dB 이내의 삽입손실, 65 dB의 격리도, 15 dB 이상의 반사손실, 30 ns 이내의 스위칭 속도를 나타내었다. 본 논문의 스위치는 위성 탑재 중계기의 마이크로웨이브 스위치 매트릭스에 적용된다. 또한 본 논문에서 제시된 스위치는 이동통신 시스템 및 마이크로파 통신 시스템에 다양하게 응용될 수 있다.

참고 문헌

[1] Kai Chang, *Microwave Solid-State Circuits and*

Applications, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

- [2] Scott A. Wartenberg, "Designing precision attenuation in a microwave PIN diode switch", *Applied Microwave & Wireless*, pp. 42-48. Nov. 1998.
- [3] HP Application Note 922, *Application of PIN*

Diodes.

- [4] Stewart Walker, "A low phase shift attenuator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 182-185, Feb. 1994.

주 인 권



1994년 2월: 한국해양대학교 해사수송공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2000년 9월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF 기술연구팀 선임연구원

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 RF 부품, 위성 중계기 부품

박 중 흥



1982년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학사)
 1997년 8월: 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
 1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)

1982년 3월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF 기술연구팀장

[주 관심분야] 위성통신, 위성 안테나, 위성 중계기, RF 부품

염 인 복



1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 9월~1995년 5월: 무궁화 위성 현장교육 참여(영국 Matra Marconi사 등)

1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 통신위성 RF 기술연구팀 선임연구원

[주 관심분야] 위성 중계기, 위성 안테나, 위성 중계기 부품